



Vestnik of Geosciences
Вестник геонаук

Февраль
February
2026,
№ 2 (374)

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

Главный редактор *А. М. Асхабов*

Зам. главного редактора *И. Н. Бурцев*

Зам. главного редактора *О. Б. Котова*

Ответственный секретарь *И. В. Козырева*

Chief Editor *A. M. Askhabov*

Deputy Chief Editor *I. N. Burtsev*

Deputy Chief Editor *O. B. Kotova*

Executive Secretary *I. V. Kozyreva*

Редакционный совет

- Л. Н. Андреева*, Сыктывкар, Россия
А. И. Антошкина, Сыктывкар, Россия
Т. М. Безносова, Сыктывкар, Россия
М. А. Богдасаров, Брест, Беларусь
М. А. Т. М. Брокманс, Тронхейм, Норвегия
Д. А. Бушнев, Сыктывкар, Россия
Ю. Л. Войтеховский, 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 (2024) — 0.462



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 (2024) — 0.462

Содержание

Content

Пирофанит и манганоильменит в гранитах третьей фазы внедрения турочакского граносиенит-гранит-лейкогранитового комплекса (г. Большой Иконостас, Горный Алтай) <i>Е. В. Наставко, Т. В. Лешуков, Б. Ю. Змеев, А. С. Слесарев, Г. А. Федосюк</i>3	Pyrophanite and manganoilmenite in granites of the third phase of the intrusion of the Turochak granosyenite-granite-leucogranite complex (Bolshoy Ikonostas Mountain, Gorny Altai) <i>E. V. Nastavko, T. V. Leshukov, B. Yu. Zmeev, A. S. Slesarev, G. A. Fedosyuk</i>3
Минералогические особенности вольфрамовых руд, влияющие на их обогатимость <i>В. Е. Жукова, Е. Г. Ожогина, Н. А. Сычева, Ю. Н. Шувалова</i> 11	Mineralogical features of tungsten ores affecting their processability <i>V. E. Zhukova, E. G. Ozhogina, N. A. Sycheva, Y. N. Shuvalova</i> 11
Биоминералогический анализ мочевых камней человека <i>В. И. Силаев, А. А. Слюсарь, А. В. Слюсарь, А. В. Кокин, А. С. Шуйский, А. Ф. Хазов, С. Н. Шанина, Б. А. Makeev, И. В. Смолева, Д. В. Киселева</i> 17	Bioin mineralogical analysis of human urinary stones <i>V. I. Silaev, A. A. Slyusar, A. B. Slyusar, A. B. Kokin, A. P. Shuisky, A. F. Khazov, S. N. Shanina, B. A. Makeev, I. B. Smoleva1, D. B. Kiseleva</i> 17
Интегральная оценка геоэкологического риска загрязнения почвенного покрова в зоне воздействия Айхальского горно-обогатительного комбината (Якутия) <i>А. Г. Гололобова, Я. Б. Легостаева, О. В. Шадринова</i>47	Integrated assessment of geoecological risk of soil contamination in the impact zone of the Aikhal Mining and Processing Plant (Yakutia, Russia) <i>A. G. Gololobova, Ya. B. Legostaeva, O. V. Shadrinova</i> ..47

Хроника, события, факты

Chronicle, events, facts

Российская конференция «Тиманиды-протоуралиды Европейского Северо-Востока: стратиграфия, магматизм, геодинамика, металлогения» (анонс) 60	Russian Conference “Timanides-Protouralides of the European Northeast: Stratigraphy, Magmatism, Geodynamics, Metallogeny” (announcement)..... 60
--	--

Правила
оформления
статей



Vestnik
article
Formatting



Пирофанит и манганоильменит в гранитах третьей фазы внедрения турочакского граносиенит-гранит-лейкогранитового комплекса (г. Большой Иконостас, Горный Алтай)

Е. В. Наставко, Т. В. Лешуков, Б. Ю. Змеев, А. С. Слесарев, Г. А. Федосюк

Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия

evnastavko@yandex.ru

В гранитах третьей фазы внедрения турочакского комплекса ($\gamma D_1 t$) установлено одновременное присутствие двух минералов группы ильменита, отличающихся размерами, расположением в породе и химическим составом. Совместно с ними встречаются зерна магнетита. Манганоильменит ($MnO - 17.95 - 22.68$ мас. %) встречается в виде идиоморфных зерен размером $150 - 200$ мкм, приуроченных к лейстам биотита. Железомарганцевое отношение варьирует от 1.18 до 1.63 . Пирофанитовый минал составляет $38 - 45$ %, редко присутствует гематитовый минал до (2 %). Общая формула имеет следующий вид: $(Fe^{2+}_{0.53-0.60}Mn_{0.38-0.45}Fe^{3+}_{0-0.02})_{\Sigma 1.00-1.01}Ti_{0.99-1.00}O_3$. Пирофанит ($MnO - 24.35 - 27.18$ мас. %) представлен мелкими (до 50 мкм) идиоморфными зернами, располагающимися в межзерновом пространстве. Железомарганцевое отношение составляет менее единицы ($FeO/MnO -$ от 0.74 до 0.93). Пирофанитовый минал составляет от 52 до 58 %, гематитовый минал отсутствует. Обобщенная формула — $(Mn_{0.52-0.58}Fe^{2+}_{0.42-0.48})_{\Sigma 1.00}Ti_{1.00}O_3$. Магнетит в породе встречается в виде изометричных идиоморфных зерен, главным образом приуроченных к биотиту, размером не более 40 мкм. Единичные зерна встречаются в плагиоклазе, где их размер достигает $150 - 180$ мкм. Магнетиту свойственно постоянное присутствие титана ($TiO_2 - 5.87 - 7.30$ мас. %) и марганца (до 0.20 %), количество общего железа FeO составляет $92.59 - 94.02$ мас. %. Общая формула магнетита — $Fe^{2+}_{1.16-1.20}(Fe^{3+}_{1.60-1.68}Ti_{0.16-0.20})_{\Sigma 1.80-1.84}O_4$. Активность кислорода, рассчитанная для пары «магнетит — манганоильменит», составляет от -26 до -24 , а для пары «магнетит — пирофанит» — -36 до -32 , что свидетельствует о восстановительных условиях при их кристаллизации.

Ключевые слова: гранит, манганоильменит, пирофанит, магнетит, турочакский комплекс, Горный Алтай

Pyrophanite and manganoilmenite in granites of the third phase of the intrusion of the Turochak granosyenite-granite-leucogranite complex (Bolshoy Ikonostas Mountain, Gorny Altai)

E. V. Nastavko, T. V. Leshukov, B. Yu. Zmeev, A. S. Slesarev, G. A. Fedosyuk

Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

The simultaneous presence of two minerals of the ilmenite group has been established in the granites of the third phase of the Turochak complex intrusion ($\gamma D_1 t$). They differ in size, location in the rock and chemical composition. Magnetite grains occur together with them. Manganoilmenite ($MnO 17.95 - 22.68$ wt.%) occurs as euhedral grains $150 - 200 \mu m$ in size, confined to biotite laths. The iron-manganese ratio varies from 1.18 to 1.63 . The pyrophanite minal makes up $38 - 45\%$, hematite minal is rarely present (up to 2%). The general formula is as follows: $(Fe^{2+}_{0.53-0.60}Mn_{0.38-0.45}Fe^{3+}_{0-0.02})_{\Sigma 1.00-1.01}Ti_{0.99-1.00}O_3$. Pyrophanite ($MnO 24.35 - 27.18$ wt.%) is represented by small (up to $50 \mu m$) euhedral grains located in the intergranular space. The iron-manganese ratio is less than unity (FeO/MnO from 0.74 to 0.93). The pyrophanite end-member makes up from 52 to 58% , the hematite end-member is absent. The generalized formula is $(Mn_{0.52-0.58}Fe^{2+}_{0.42-0.48})_{\Sigma 1.00}Ti_{1.00}O_3$. Magnetite in the rock occurs as isometric euhedral grains, mainly confined to biotite, no more than $40 \mu m$ in size. Single grains are found in plagioclase; their size reaches $150 - 180 \mu m$. Magnetite is characterized by the constant presence of titanium ($TiO_2 5.87 - 7.30$ wt.%) and manganese (up to 0.20%), the amount of total iron is $FeO 92.59 - 94.02$ wt.%. The general formula of magnetite is $Fe^{2+}_{1.16-1.20}(Fe^{3+}_{1.60-1.68}Ti_{0.16-0.20})_{\Sigma 1.80-1.84}O_4$. The oxygen activity calculated for the "magnetite-manganoilmenite pair is from -26 to -24 , and for the magnetite-pyrophanite pair -36 to -32 , which indicates reducing conditions during their crystallization.

Keywords: granite, manganoilmenite, pyrophanite, magnetite, Turochak complex, Altai Mountains

Для цитирования: Наставко Е. В., Лешуков Т. В., Змеев Б. Ю., Слесарев А. С., Федосюк Г. А. Пирофанит и манганоильменит в гранитах третьей фазы внедрения турочакского граносиенит-гранит-лейкогранитового комплекса (г. Большой Иконостас, Горный Алтай) // Вестник геонаук. 2026. 2(374). С. 3–10. DOI: 10.19110/geov.2026.2.1

For citation: Nastavko E. V., Leshukov T. V., Zmeev B. Yu., Slesarev A. S., Fedosyuk G. A. Pyrophanite and manganoilmenite in granites of the third phase of the intrusion of the Turochak granosyenite-granite-leucogranite complex (Bolshoy Ikonostas Mountain, Gorny Altai). Vestnik of Geosciences, 2026, 2(374), pp. 3–10. DOI: 10.19110/geov.2026.2.1

Введение

Акцессорные минералы могут служить индикаторами многих процессов, а их исследование позволяет делать выводы о связи оруденения с магматическим комплексом (Ляхович, 1979). Манганоильменит является промежуточным членом изоморфного ряда ильменит (FeTiO_3)—пирофанит (MnTiO_3), «содержание» марганца в нем превышает 13 мас. % (Минералы, 1967).

Пирофанит и манганоильменит являются второстепенными и акцессорными минералами марганцевых месторождений (Смолянинова, Борисовский, 1984; Старикова, Завилейский, 2010; Калугин, Брусницын, 2012; Савельев, 2014; Pattnaik, Majhi, 2024; Mušlan et al., 2025), щелочных комплексов (Немов, 2017; Попов и др., 2017; Shubin, Kogarko, 2022), кимберлитов (Филиппов, Мальков, 2005; Каминский, Белоусов, 2009; Путинцева, Спиридонов, 2017), метаморфизованных железных руд (Zaccarini et al., 2004), скарнов и приуроченных к ним руд (Ятимов и др., 2024; Voudouris et al., 2013; Espeche, Lira, 2020), ультраосновных и основных пород (Самигуллин и др., 2024). В гранитных породах данные минералы встречаются довольно часто, при этом информация об их строении и составе редко рассмотрена достаточно детально (Елбаев и др., 2021), в большинстве работ носит ограниченный характер (Sasaki et al., 2003; Sami et al., 2004; Xie et al., 2004; Tarassova, Tarassov, 2012; Полякова, 2013).

Вопросы состава и генетических особенностей пирофанита и манганоильменита в гранитоидах до сих пор являются открытыми и дискуссионными. На сегодняшний день предполагается несколько факторов, влияющих на их присутствие в гранитах. Так, например, в 60-х гг. XX века появление марганецсодержащего ильменита и пирофанита связывали с низкой температурой кристаллизации (Buddington, Lindsley, 1964; Anderson, 1968). Позже появилась точка зрения, что причиной является магматическая дифференциация (Багдасаров, 1986; Sasaki et al., 2003). Кроме того, основным фактором рассматривался привнос марганца гидротермальными растворами (Тарасова, Тарасов, 1998). В начале XXI века нахождение манганоильменита и пирофанита в гранитах стали связывать с окислительной обстановкой (Shroeder et al., 2002; Rene, 2011).

При петрографическом изучении гранитоидов третьей фазы внедрения турочакского комплекса авторами обнаружены пирофанит и манганоильменит. В статье приводятся данные об их химическом составе, морфологии зерен, а также оценка температуры и активности кислорода при гранитообразовании.

Объект и методы исследования

Исследование минералов проводилось в полированных шлифах с углеродным напылением. Химический

Рис. 1. Схема расположения и строения турочакского массива (по: Государственная..., 2007):

1–3 — разрывные нарушения: 1, 2 — достоверные: 1 — главные, 2 — прочие, 3 — предполагаемые; 4 — кебезенский плагинейсово-амфиболитовый комплекс (PR_2kb); 5 — эсконгинская свита ($\text{E}_{1\text{es}}$), 6 — усть-анзасско-манжерокская свита ($\text{E}_{1\text{um}}$); 7 — убинско-тырганская группа свит ($\text{E}_{1\text{ut}}$); 8 — сийская терригенно-карбонатная свита ($\text{E}_{1\text{ss}}$); 9 — еландинско-тандошинская группа свит ($\text{E}_{2-3\text{et}}$); 10 — алзасская свита ($\text{O}_{1\text{al}}$); 11 — ишпинская свита ($\text{O}_{1\text{is}}$); 12 — нырнинская свита ($\text{D}_{1-2\text{nr}}$), 13 — кротинско-саганская группа свит (D_2ks); 14 — саракошинский диорит-тоналит-плагиигранитовый комплекс (γpEs), 15 — югалинский габбро-диорит-гранодиоритовый комплекс ($\text{q}\delta\text{-}\gamma\delta\text{D}_{1\text{ju}}$); 16 — турочакский граносиенит-гранит-лейкогранитовый комплекс (D_1t): а — порфировидные биотитовые граниты и лейкограниты, граносиениты, аляскиты, аплитовидные граниты ($\gamma\text{D}_{1\text{t}}$), б — порфировидные биотитовые умеренно-щелочные граниты и лейкограниты ($\varepsilon\gamma\text{-}\varepsilon\gamma\text{D}_{1\text{t}}$); 17 — топольнинский диорит-гранодиоритовый комплекс ($\gamma\text{D}_{2\text{tp}}$); 18 — озерно-аллювиальные четвертичные отложения (Q_{III}); 19 — место отбора проб

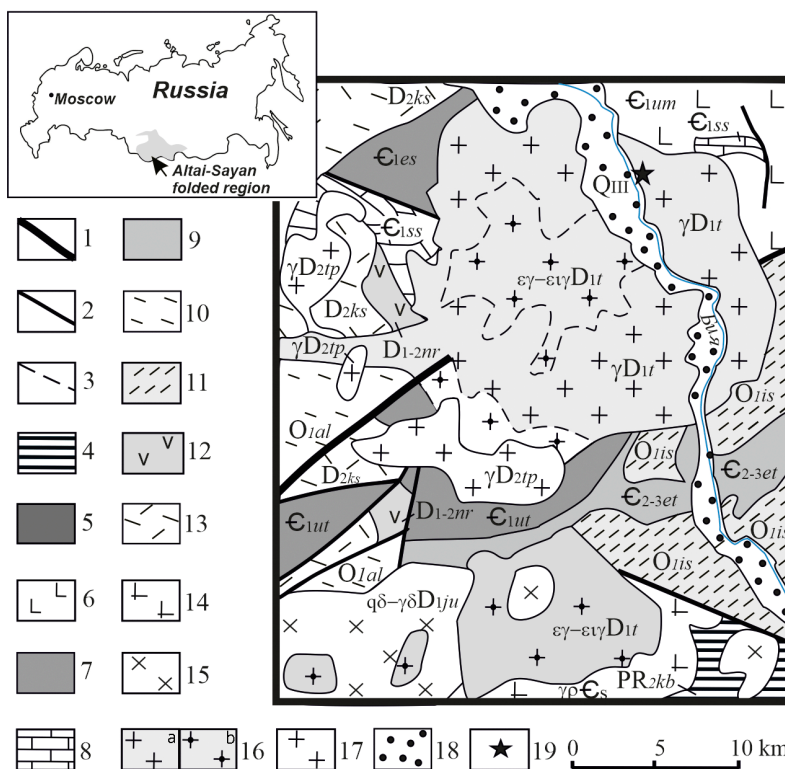


Fig. 1. Scheme of the location and structure of the Turochak granosyenite-granite-leucogranite complex (according to: State..., 2007):

1–3 — faults: 1, 2 — reliable: 1 — main, 2 — other, 3 — inferred; 4 — Kebezen plagiogneiss-amphibolite complex (PR_2kb); 5 — Eskongin suite ($\text{E}_{1\text{es}}$), 6 — Ust-Anzas-Manzherok suite ($\text{E}_{1\text{um}}$); 7 — Uba-Tyrgan group of suites ($\text{E}_{1\text{ut}}$); 8 — Syys terrigenous-carbonate suite ($\text{E}_{1\text{ss}}$); 9 — Elandin-Tandoshin group of suites ($\text{E}_{2-3\text{et}}$); 10 — Alzas suite ($\text{O}_{1\text{al}}$); 11 — Ishpin suite ($\text{O}_{1\text{is}}$); 12 — Nyrnin suite ($\text{D}_{1-2\text{nr}}$), 13 — Krotin-Sagan group of suites (D_2ks); 14 — Sarakokshin diorite-tonalite-plagiogranite complex (γpEs), 15 — Yugalin gabbro-diorite-granodiorite complex ($\text{q}\delta\text{-}\gamma\delta\text{D}_{1\text{ju}}$); 16 — Turochak granosyenite-granite-leucogranite complex (D_1t): a — porphyritic biotite granites and leucogranites, granosyenites, alaskites, aplite-like granites ($\gamma\text{D}_{1\text{t}}$), b — porphyritic biotite moderately alkaline granites and leucogranites ($\varepsilon\gamma\text{-}\varepsilon\gamma\text{D}_{1\text{t}}$); 17 — Topolnin diorite-granodiorite complex ($\gamma\text{D}_{2\text{tp}}$); 18 — lacustrine-alluvial Quaternary deposits (Q_{III}); 19 — sampling site



состав минералов, их однородность, морфология, степень идиоморфизма, взаимоотношение с другими минералами изучались при помощи сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Tescan Vega3 с приставкой рентгенофлуоресцентного энергодисперсионного анализа Oxford. Ускоряющее напряжение для СЭМ-съемки и анализа полированных шлифов гранитов составило 20 кВ.

Всего произведено 92 определения химического состава: 78 минералов группы ильменита (манганоильменит — 42, пирофанит — 36) из 10 образцов гранитов и 14 — магнетита в 7 образцах гранитов. В работе приведено по 7 определений каждого минерала. На диаграмме «ильменит — гематит — пирофанит» приведены фигуративные точки состава для всех 78 определений.

Отбор проб гранитов (9 проб из 10 образцов) осуществлен на расстоянии 35–75 метров из коренных выходов горы Большой Иконостас. Одна проба получена из скального выхода у подножия горы на уровне уреза воды р. Бия. Все пробы отнесены к гранитам третьей фазы внедрения турочакского комплекса. Для всех образцов выполнено петрографическое описание и кристаллохимический пересчет состава минералов с помощью программного обеспечения PetroExplorer v.3.2, MineralCalc v.1.1 (Кориневский, 2015).

Для оценки показателя кислородного потенциала использованы магнетит-ильменитовая и магнетит-пирофанитовая пары с применением программ ILMAT 1.20 (Lepage, 2003) и MagMin_PT (Gündüz, Asan, 2023). В первой паре минералы, выбранные для расчета, располагаются в общих лейстах биотита. Минералы второй пары совместно в биотите не встречаются. Поэтому для расчета выбиралась пара, в которой магнетит располагается в биотите или плагиоклазе, а пирофанит — на границе биотита и плагиоклаза.

Краткая характеристика турочакского комплекса

Раннедевонский турочакский граносиенит-гранит-лейкогранитовый комплекс ($\gamma D_1 t$) относится к Горно-Алтайскому сегменту, который является редуцированной частью Алтае-Минусинского ранне- и среднедевонского магматического пояса Алтае-Саянской складчатой области (рис. 1). Формирование пояса происходило в условиях активной континентальной окраины кордильерского типа.

Турочакский массив является петротипом турочакского комплекса и имеет трехфазное строение. Породы первых двух фаз внедрения, суммарно составляющие не более 10 %, слагают центральную часть массива. Первая и вторая фазы представлены меланогранитами и гранитами, которые по мере приближения к периферии массива сменяются субщелочными лейкогранитами. Третья фаза внедрения, составляющая до 90 %, представленная неравнозернистыми, порфирированными и аплитовидными биотитовыми, биотит-мусковитовыми лейкогранитами, умеренно щелочными лейкогранитами и аляскитами, слагает периферические части массива. Для лейкогранитов данной фазы характерно повышенное содержание кварца (до 50 % в аляскитах), отсутствие амфибола, а также преобладание биотита над мусковитом

и калиевого полевого шпата над кислым плагиоклазом. Аксессуары: магнетит, ильменит, титанит, апатит и циркон. Отмечено спорадическое присутствие граната, ортита и монацита.

Турочакские граниты и лейкограниты по своему химическому составу относятся к породам нормальной и умеренно щелочной серии (SiO_2 — 73.40–76.41 %, Al_2O_3 — 12.08–13.65 %, Na_2O — 3.40–4.07 %, K_2O — 4.00–4.78 %) и близки к высокоглиноземистым гранитам S-типа (Государственная..., 2007). По содержанию Y, Nb, Ta, Yb, и Rb граниты и лейкограниты комплекса соответствуют островодужным и коллизионным гранитоидам, приближаясь к составу внутриплитных образований. А. И. Гусев рассматривает данные гранитоиды как двуполевошпатовые субсольвусные граниты A-типа (Гусев, 1994).

Возраст комплекса, полученный U-Pb-методом по цирконам из порфирированных биотитовых гранитов Турочакского массива горы Большой Иконостас (390 ± 6 млн лет) и умеренно-щелочных гранитов горы Цаган (400 ± 4 млн лет), соответствует раннедевонскому (Государственная..., 2007).

Минералого-петрографическая характеристика гранитов третьей фазы внедрения турочакского комплекса

Граниты основной, третьей, фазы внедрения турочакского граносиенит-гранит-лейкогранитового комплекса макроскопически представляют собой лейкократовые породы со светло-розовым до розового окрасом. Часто граниты покрыты черными пленками окислов и гидроокислов марганца. Породы макроскопически имеют среднезернистую, реже крупнозернистую, порфирированную, гипидиоморфнозернистую структуру и массивную текстуру. Под микроскопом устанавливается типичная гранитная, местами микропегматитовая структура. Минералого-петрографические особенности пород показаны на рисунке 2.

Породы сложены калиевым полевым шпатом (35–40 %), плагиоклазом альбитового состава ((An_{0-3}) 25–30 %) и кварцем (25–30 %). Для калиевого полевого шпата характерна микроклиноватая решетка, что позволяет отнести его к микроклину. Кварц ксеноморфен, его зерна заполняют интерстиции. Слюда представлена биотитом, количество которого достигает 10 %, и мусковитом (до 1 %). Для пород характерен широкий набор аксессуарных минералов: апатита, циркона, титанита, магнетита, минералов группы эпидота (алланит-Ce с каймой из редкоземельного эпидота и эпидот) — и группы ильменита (пирофанит и манганоильменит). Вторичные изменения породы представлены слабой хлоритизацией биотита и незначительной сосюритизацией плагиоклаза. Аксессуарные минералы приурочены преимущественно к хлоритизированным лейстам биотита. Кроме собственно марганцевых минералов — пирофанита и ильменита — в породах встречается алланит-(Ce), также обогащенный марганцем, содержание MnO в нем составляет от 2.86 до 4.09 мас. % (Наставко и др., 2024).

Манганоильменит представлен идиоморфными зёрнами, встречающимися исключительно в слабохлоритизированном биотите, размер зерен достигает 150–200 мкм (рис. 3, а–е).

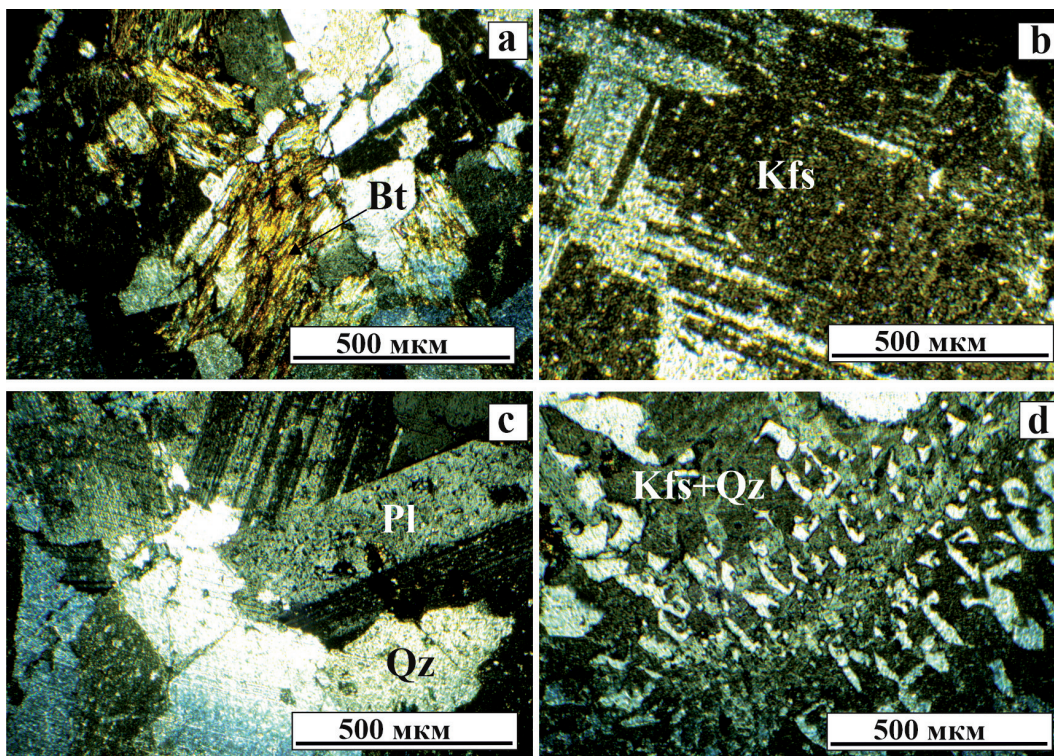


Рис. 2. Петрографические особенности гранитов.

Фото с анализатором. Индексы минералов здесь и далее приводятся по Warr, 2021: Bt — биотит, Kfs — калиевый полевой шпат, Pl — плагиоклаз, Qz — кварц

Fig. 2. Petrographic features granites.

Photo with analyzer. The symbols used here and throughout the text are given according to Warr, 2021: Bt — biotite, Kfs — potassium feldspar, Pl — plagioclase, Qz — quartz

Пирофанит встречается в породе в виде идиоморфных зерен, размер которых значительно меньше, чем у манганоильменита, и не превышает 50 мкм. Зерна располагаются в межзерновом пространстве биотита и кварца или биотита и полевых шпатов (рис. 3, a, b, d–h).

Магнетит в виде идиоморфных изометричных зерен размером до 35–40 мкм встречается в лейстах биотита (рис. 3, d, f–h), а также в плагиоклазе, где размер зерен достигает 150–180 мкм (рис. 3, g).

Результаты исследований и их обсуждение

При помощи электронного микроскопа было установлено, что в исследуемых гранитах одновременно с магнетитом присутствуют различные по размерам, идиоморфизму и составу минералы группы ильменита.

Манганоильменит характеризуется узким диапазоном состава (таблица). Содержание железа FeO варьирует от 25.05 до 29.01 мас. %, марганца — от MnO 17.95 до 22.68 мас. %, количество титана TiO_2 — 52.24–53.07 мас. %. Из примесей в нем обнаружен лишь алюминий, количество которого не превышает 0.04 мас. %. Железомарганцевое отношение составляет более единицы (FeO/MnO — от 1.18 до 1.63). Доля пирофанитового минала составляет 38–45 %, также в некоторых пробах присутствует гематитовый минал, количество которого не превышает 2 %. Общая формула имеет следующий вид: $(Fe^{2+}_{0.53-0.60}Mn_{0.38-0.45}Fe^{3+}_{0-0.02})_{\Sigma 1.00-1.01}$

$Ti_{0.99-1.00}O_3$ (n = 32). Присутствие гематитового минала свидетельствует о более окислительных условиях при формировании манганоильменита по сравнению с пирофанитом.

Химический состав *пирофанита* следующий: TiO_2 — 52.78–53.09 мас. %, MnO — 24.35–27.18 мас. %, FeO — 20.02–22.73 мас. %, количество Al_2O_3 не превышает 0.02 мас. % (таблица 1) и соответствует железистому пирофаниту (рис. 4). Железомарганцевое отношение составляет менее единицы (FeO/MnO от 0.74 до 0.93). Доля пирофанитового минала выше, чем у манганоильменита, и составляет узкий диапазон от 52 до 58 %. Общая формула имеет следующий вид: $(Mn_{0.52-0.58}Fe^{2+}_{0.42-0.48})_{\Sigma 1.00}Ti_{1.00}O_3$ (n = 46).

Магнетит в своем составе постоянно содержит титан (TiO_2 5.87–7.30 мас. %) и марганец (до 0.20 %), количество общего железа FeO составляет 92.59–94.02 мас. %. Общая формула магнетита следующая: $Fe^{2+}_{1.16-1.20}(Fe^{3+}_{1.60-1.68}Ti_{0.16-0.20})_{\Sigma 1.80-1.84}O_4$ (n = 14).

Активность кислорода ($lgfO_2$), рассчитанная при помощи программ ILMAT 1.20 (Lepage, 2003) и MagMin_PT (Gündüz, Asan, 2023), для близких по времени образования минералов минеральной пары «магнетит — манганоильменит» составила узкий диапазон от –26 до –24, а для пары «магнетит — пирофанит» — от –36 до –32. Полученные данные указывают на низкую активность кислорода при кристаллизации данных минералов.

Восстановительный характер и обилие ильменита свойственно внутриплитным и коллизионным гра-

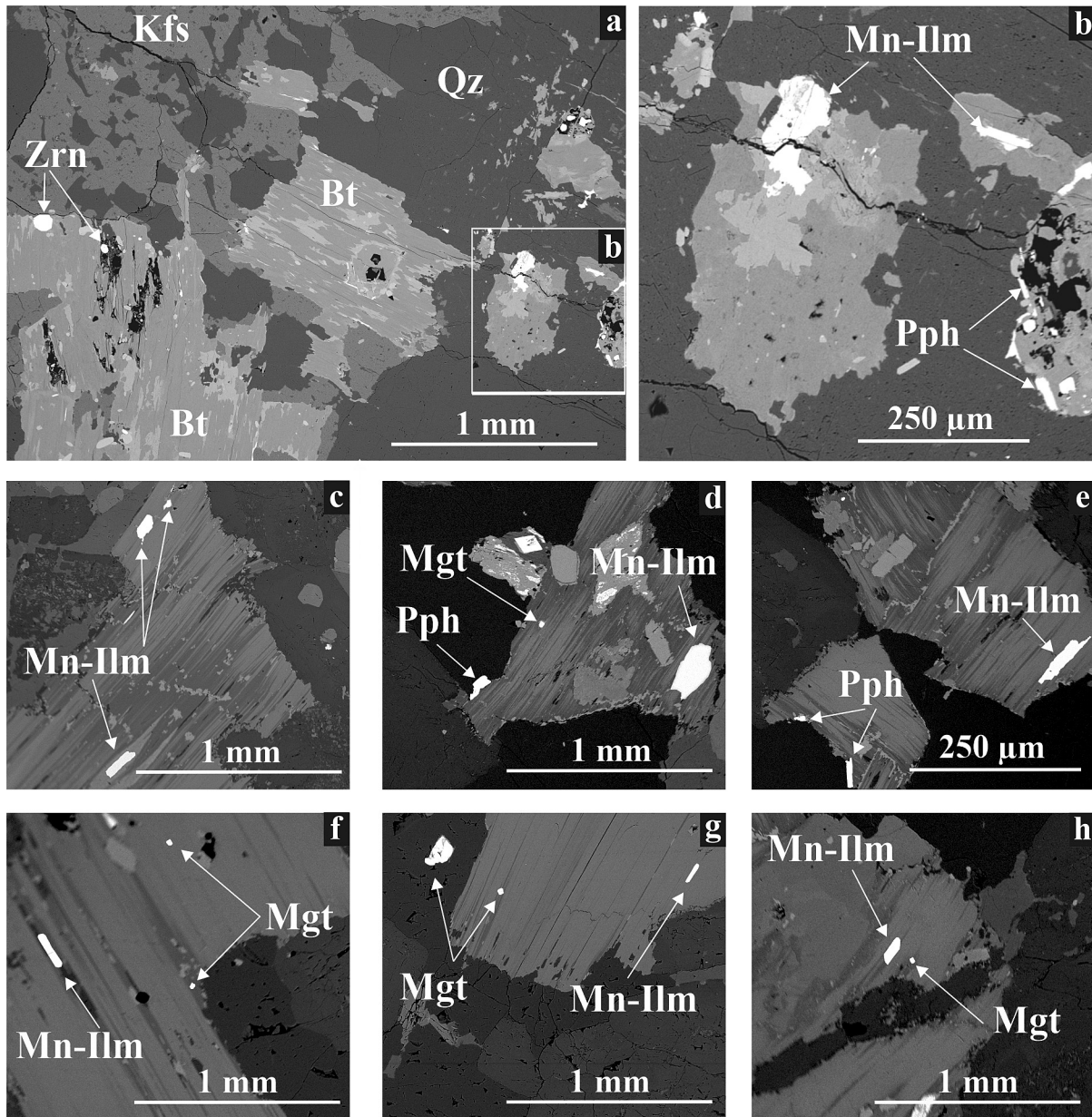


Рис. 3. BSE-изображения манганоильменита (Mn-Ilm), пирофанита (Pph) и магнетита (Mgt) в граните. Условные обозначения: Bt – биотит, Kfs – калиевый полево шпат, Qz – кварц, Zrn – циркон

Fig. 3. BSE image of manganoilmenite (Mn-Ilm), pyrophanite (Pph) and magnetite (Mgt) in granite. Legend: Bt – biotite, Kfs – potassium feldspar, Qz – quartz, Zrn – zircon

Таблица 1. Химический состав (мас. %) и кристаллохимические коэффициенты пирофанита (1–7), манганоильменита (8–14) и магнетита (15–21)

Table 1. Chemical composition (wt.%) and crystallochemical coefficients of pyrophanite (1–7), manganoilmenite (8–14) and (15–21) magnetite

Компоненты/Components	1	2	3	4	5	6	7
TiO ₂	52.86	53.09	52.79	52.78	52.80	53.00	52.90
Al ₂ O ₃	0.01	0.02	0.02	0.02	0	0	0.02
FeO _{общ/tot}	22.67	22.17	21.49	20.02	21.99	21.13	22.73
MnO	24.46	24.72	25.70	27.18	25.21	26.87	24.35
Сумма/Total	100	100	100	100	100	100	100
Коэффициенты в формуле / Coefficients in the formula, O = 3 (ATiO ₃)							
Ti	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Fe ^{3+*}	-	-	-	-	-	-	-
Fe ²⁺	0.48	0.47	0.45	0.42	0.46	0.43	0.44
Mn	0.52	0.53	0.55	0.58	0.54	0.57	0.56
Сумма/Total	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00

Компоненты/Components	8	9	10	11	12	13	14
TiO ₂	52.24	53.03	52.25	52.67	52.80	52.64	53.07
Al ₂ O ₃	0.03	0.01	0.03	0.02	0.04	0.03	0.01
FeO _{общ/tot}	25.05	29.01	27.36	27.59	27.77	28.39	28.47
MnO	22.68	17.95	20.36	19.72	19.39	18.94	18.45
Сумма/Total	100	100	100	100	100	100	100
Коэффициенты в формуле / Coefficients in the formula, O = 3 (ATiO ₃)							
Ti	0.99	1.00	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00
Fe ^{3+*}	0.02	-	0.02	-	-	0.01	-
Fe ²⁺	0.53	0.62	0.56	0.58	0.59	0.59	0.61
Mn	0.45	0.38	0.43	0.42	0.41	0.40	0.39
Сумма/Total	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Компоненты/Components	15	16	17	18	19	20	21
TiO ₂	6.16	7.25	7.30	6.85	5.98	5.89	5.87
FeO _{общ/tot}	93.69	92.63	92.59	93.02	93.86	93.98	94.02
MnO	0.15	0.12	0.11	0.13	0.16	0.13	0.11
Сумма/Total	100	100	100	100	100	100	100
Коэффициенты в формуле / Coefficients in the formula, O = 4 (AB ₂ O ₄)							
Ti	0.17	0.20	0.20	0.19	0.16	0.16	0.16
Fe ^{3+*}	1.67	1.61	1.60	1.63	1.68	1.68	1.68
Fe ²⁺	1.16	1.19	1.20	1.18	1.16	1.16	1.16
Сумма/Total	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00

Кристаллохимические формулы / Crystal-chemical formulas:

1–7 – (Mn_{0.52–0.58}Fe²⁺_{0.42–0.48})_{Σ1.00}Ti_{1.00}O₃ пирофанит / pyrophanite

8–14 – (Fe²⁺_{0.53–0.60}Mn_{0.38–0.45}Fe³⁺_{0–0.02})_{Σ1.00–1.01}Ti_{0.99–1.00}O₃ – манганоильменит / manganoilmenite

15–21 – Fe²⁺_{1.16–1.20}(Fe³⁺_{1.60–1.68}Ti_{0.16–0.20})_{Σ1.80–1.84}O₄ – магнетит / magnetite

Примечание: коэффициенты элементов, значение которых составляет менее 0.01, не приводятся

Note: coefficients of elements with value less than 0.01 are not given

* – Fe³⁺ рассчитано по (Droop, 1987) / Fe³⁺ calculated according to (Droop, 1987).

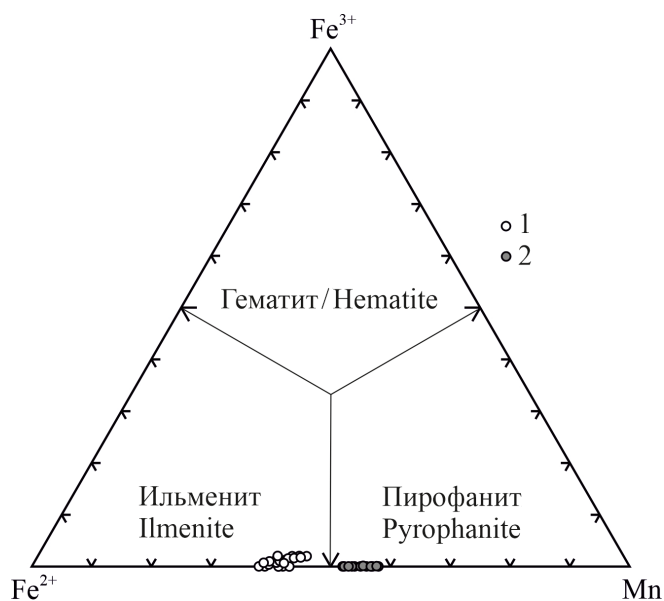


Рис. 4. Состав минералов группы ильменита в координатах Fe²⁺–Mn–Fe³⁺ (мольные доли от (Fe²⁺+Mn+Fe³⁺)):

1 – манганоильменит, 2 – пирофанит

Fig. 4. Composition of ilmenite group minerals in Fe²⁺–Mn–Fe³⁺ coordinates (molar fractions of (Fe²⁺+Mn+Fe³⁺)):

1 – manganoilmenite, 2 – pyrophanite

нитоидам S- и A-типов (Loiselle, Wones, 1979), к которым, по разным данным (Государственная..., 2007; Гусев, 1994), относятся гранитоиды турочакского комплекса.

Выводы

В гранитах третьей фазы внедрения турочакского комплекса совместно с магнетитом обнаружено одновременно наличие двух минералов группы ильменита – манганоильменита и железистого пирофанита. Оба минерала являются беспримесными, отличаются расположением в породе, размерами зерен и железомарганцевым отношением. Магнетит характеризуется высокими содержаниями титана при низких количествах марганца. Показатель активности кислорода свидетельствует о восстановительных условиях при кристаллизации исследуемых минералов.

Литература / References

Багдасаров Э. А. Сравнительная характеристика состава ильменитов изверженных пород // Записки Всероссийского минералогического общества. 1986. № 2. С. 155–165.

Bagdasarov E. A. Comparative characteristics of the composition of ilmenites from igneous rocks. Proceedings of the All-Russian Mineralogical Society. 1986;2:155–165. Russian.



- Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1 000 000. Третье поколение. Серия Алтае-Саянская. Лист N-45 — Новокузнецк. Объяснительная записка. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2007. 665 с. State Geological Map of the Russian Federation on a scale of 1:1 000 000. The third generation. The Altai-Sayan series. Sheet N-45 — Novokuznetsk. Explanatory note. Saint Petersburg: VSEGEI Publishing House; 2007. 665 p. Russian.
- Гусев А. И. Интрузивный магматизм Синюхинского золоторудного узла (северо-восточная часть Горного Алтая) // Геология и геофизика. 1994. № 11. С. 28—40. Gusev A. I. Intrusive magmatism of the Sinyukhinsky gold ore cluster (northeastern part of the Altai Mountains). Geology and Geophysics. 1994;11:28—40. Russian.
- Елбаев А. Л., Гордиенко И. В., Орсов Д. А., Ходырева Е. В. Пирофанит и манганоильменит в гранитоидах Хамнигадайского массива (Центральное Забайкалье) // Геосферные исследования. 2021. № 4. С. 50—61. DOI: 10.17223/25421379/21/4. Elbaev A. L., Gordienko I. V., Orsoev D. A., Khodyreva E. V. Pyrophanite and manganoilmenite in granitoids of the Khamnigadai massif (Central Transbaikalia). Geospheric studies. 2021;4:50—61. Russian.
- Калугин П. С., Брусницын А. И. Новые данные о минералогии марганцевых руд Парнокского месторождения, Полярный Урал // Металлогения древних и современных океанов. 2012. № 1. С. 86—90. Kalugin P. S., Brusnitsyn A. I. New data on the mineralogy of manganese ores of the Parnok deposit, Polar Urals. Metallogeny of ancient and modern oceans. 2012;1:86—90. Russian.
- Каминский Ф. В., Белоусова Е. А. Манганоильменит как минерал-спутник алмаза в кимберлитах // Геология и геофизика. 2009. Т. 50. № 12. С. 1560—1570. Kaminsky F. V., Belousova E. A. Manganoilmenite as a diamond-associated mineral in kimberlites. Geology and Geophysics. 2009;50(12):1560—1570. Russian.
- Кориневский Е. В. PetroExplorer — система для создания геохимических информационно-аналитических массивов в процессе тематических исследований // Геоинформатика. 2015. № 4. С. 48—53. Korinevsky E. V. PetroExplorer — a system for creating geochemical information and analytical arrays in the process of thematic studies. Geoinformatics. 2015;4:48—53. Russian.
- Ляхович В. В. Акцессорные минералы горных пород. М.: Недра, 1979. 296 с. Lyakhovich V. V. Accessory minerals of rocks. Moscow: Nedra; 1979. 296 p. Russian.
- Минералы: Справочник. М.: Наука, 1967. Т. 2. Вып. 3. 676 с. Minerals. Handbook. Moscow: Nauka; 1967. 2(3):676 p. Russian.
- Наставко Е. В., Змеев Б. Ю., Федосюк Г. А. Температура кристаллизации гранитов Турочакского граносиенит-гранит-лейкогранитового комплекса на основе изучения химического состава минералов группы эпидота // Успехи современного естествознания. 2024. № 10. С. 88—95. DOI: 10.17513/use.38323. Nastavko E. V., Zmeev B. Yu., Fedosyuk G. A. Crystallization temperature of granites of the Turochak granosyenite-granite-leucogranite complex based on the study of the chemical composition of epidote group minerals. Successes of modern natural science. 2024;10:88—95. Russian.
- Немов А. Б. Манганоильменит и пирофанит из сиенитов ильмено-вишневогорского щелочного комплекса (Южный Урал) // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2017. № 5. С. 14—19. DOI: 10.19110/2221-1381-2017-5-14-19. Nemov A. B. Manganoilmenite and pyrophanite from syenites of the Ilmeno-Vishnevogorsk alkaline complex (Southern Urals). Vestnik of the IG Komi SC UB RAS. 2017;5:14—19. Russian.
- Самигуллин А. А., Савельев Д. Е., Васильев А. М., Никонов В. Н. Петрохимические и минералогические особенности габбро-долеритов Суранского флюоритового месторождения (Южный Урал) // Геологический вестник. 2024. № 1. С. 76—90. DOI: 10.31084/2619-0087/2024-1-6. Samigullin A. A., Savelyev D. E., Vasiliev A. M., Nikonov V. N. Petrochemical and mineralogical features of gabbro-dolerites of the Suran fluorite deposit (Southern Urals). Geological Bulletin. 2024;1:76—90. Russian.
- Полякова Е. В. Ассоциация ильменита, пирофанита и псевдуртила в гранитоидах Северного массива (Чукотка) // Записки Горного института. 2013. Т. 200. С. 258—262. Polyakova E. V. Association of ilmenite, pyrophanite and pseudorutile in granitoids of the Northern massif (Chukotka). Zapiski Gornogo Instituta. 2013;200:258—262. Russian.
- Попов В. А., Попова В. И., Блинов И. А. Минеральные ассоциации и состав акцессорного магнетита вишневогорского щелочного комплекса на Южном Урале // Минералогия. 2017. Т. 3. № 4. С. 3—11. Popov V. A., Popova V. I., Blinov I. A. Mineral associations and composition of accessory magnetite of the Vishnevogorsk alkaline complex in the Southern Urals. Mineralogy. 2017;3(4):3—11. Russian.
- Путинцева Е. В., Спиридонов Э. М. Минералы группы ильменита древнейших в России алмазосных кимберлитов Кимозера, Карелия // Записки Российского минералогического общества. 2017. Т. 146. № 3. С. 69—86. Putintseva E. V., Spiridonov E. M. Minerals of the ilmenite group of the oldest diamond-bearing kimberlites in Russia of Kimozero, Karelia. Proceedings of the Russian Mineralogical Society. 2017;146(3):69—86. Russian.
- Савельев С. О. Минералогия марганцевых руд месторождения Жомарт, Атасуйский район, Центральный Казахстан // Металлогения древних и современных океанов. 2014. № 1. С. 87—91. Savelyev S. O. Mineralogy of manganese ores of the Zhomart deposit, Atasu district, Central Kazakhstan. Metallogeny of ancient and modern oceans. 2014;1:87—91. Russian.
- Смольянинова В. Н., Борисовский С. Е. Пирофанит в марганцевых рудах месторождения Прозрачное (Горный Алтай) // Известия АН СССР. Серия: Геология. 1984. № 9. С. 131—136. Smolyaninova V. N., Borisovsky S. E. Pyrophanite in manganese ores of the Prozrachnoye deposit (Altai Mountains). Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Series: Geology. 1984;9:131—136. Russian.
- Старикова Е. В., Завилейский Д. И. Геологическая позиция и вещественный состав фаменских марганцевых руд лемвинской зоны Пай-Хоя (на примере рудопоявлений Нижнесиловской группы) // Литология и полезные ископаемые. 2010. № 4. С. 383—400. Starikova E. V., Zavileyskiy D. I. Geological position and substance composition of Famensky manganese ores of the Lemvinskaya zone of Pай-Hoya (on the example of ore occurrences of the Nizhnesilovskaya group) // Lithology and useful minerals. 2010. № 4. С. 383—400.

- Starikova E. V., Zavileyskiy D. I. Geological position and material composition of Famennian manganese ores of the Lemvin zone of Pai-Khoi (using the example of ore occurrences of the Nizhnesilovskaya group). *Lithology and useful minerals*. 2010;4:383–400. Russian.
- Филиппов В. Н., Мальков Б. А. Барифлогодит и акцессорный пирофанит в алмазоносном кимберлите из трубки Ермаковской-7 на Кольском полуострове // Вестник Института геологии Коми научного центра Уральского отделения РАН. 2005. № 8 (128). С. 5–10.
- Filippov V. N., Malkov B. A. Baryophlogopite and accessory pyrophanite in diamond-bearing kimberlite from the Ermakovskaya-7 pipe on the Kola Peninsula. *Vestnik of the Institute of Geology of the Komi SC UB RAS*. 2005;8(128):5–10. Russian.
- Ятимов У. А., Блинов И. А., Рассомахин М. А., Лебедева С. М., Сафаралиев Н. С. Минералы титана в рудах и скарнах магнетит-полиметаллического месторождения Актас, Западный Карамазар, Таджикистан // Минералогия. 2024. Т. 10. № 4. С. 172–185. DOI: 10.35597/2313-545X-2024-10-4-9.
- Yatimov U. A., Blinov I. A., Rassomakhin M. A., Lebedeva S. M., Safaraliyev N. S. Titanium minerals in ores and skarns of the Aktash magnetite-polymetallic deposit, Western Karamazar, Tajikistan. *Mineralogy*. 2024;10(4):172–185. Russian.
- Anderson A. T. Oxidation of the LaBlache lake titaniferous magnetite deposit, Quebec. *Journal of Geology*. 1968;76:528–547.
- Buddington A. F., Lindsley D. H. Iron-Titanium Oxide Minerals and Synthetic Equivalents. *Journal of Petrology*. 1964;5:310–357.
- Droop G. T. R. A general equation for estimating Fe³⁺ concentrations in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses, using stoichiometric criteria. *Mineralogical Magazine*. 1987;51(361):431–435. DOI: 10.1180/minmag.1987.051.361.10
- Espeche M. J., Lira R. Pyrophanite in a scheelite skarn, Sierras Pampeanas, Cordoba, Argentina: a new paragenetic occurrence. XII Congreso Argentino de Geología Económica. 2020. P. 80–86.
- Gündüz M, Asan K. MagMin_PT: An Excel-based mineral classification and geothermobarometry program for magmatic rocks. *Mineralogical Magazine*. 2023;87(1):1–9. DOI: 10.1180/mgm.2022.113
- Lepage L. D. ILMAT: an Excel worksheet for ilmenite-magnetite geothermometry and geobarometry. *Computers and Geosciences*. 2003;29:673–678. DOI: 10.1016/S0098-3004(03)00042-6
- Loiselle M. C., Wones D. R. Characteristics and Origin of Anorogenic Granites. *Geological Society of America Abstracts with Programs*. 1979;11:468 p.
- Myšlan-P., Števko M., Sejkora J., Ružička P. Mikuš T. Metamorphic manganese mineralisation bound to the metacarbonate lenses at the Smolník – Malá Hekerová deposit in the Spišskogemerské Rudohorie Mts., Western Carpathians (Slovakia). *Mineralogy and Petrology*. 2025;119:243–258. DOI: 10.1007/s00710-025-00922-4
- Pattnaik S., Majhi S. Mineralogy, geochemistry and genesis of low-grade manganese ores of Anujurhi area, Eastern Ghats, India. *Geologija*. 2024;67(2):285–300. DOI: 10.5474/geologija.2024.014
- Peters T. Feenstra A. Experimental determination of activities in FeTiO₃-MnTiO₃ ilmenite solid solution by redox reversals. *Contributions to mineralogy and petrology*. 1996;126:P.109–120.
- Rene M. Titanite-ilmenite assemblage in microgranodiorites from the northeastern margin of the Klenov granite body (Bohemian Massif, Czech Republic). *Acta Geodynamica and Geomaterialia*. 2011;8(4(164)):479–487.
- Sami M., Fathy D., Ntaflos T., Mahdy N. M. Composition and origin of Ti-Nb-Ta-Zr bearing minerals in the Abu Diab highly evolved granite from the Central Eastern Desert of Egypt. *Journal of African Earth Sciences*. 2020;165:103–808. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2020.103808
- Sasaki K., Nakashima K., Kanisawa S. Pyrophanite and high Mn ilmenite discovered in the Cretaceous Tono pluton, NE Japan. *Neues Jahrbuch für Mineralogie – Monatshefte*, 2003;7:302–320.
- Shubin I. I., Kogarko L. N. Geochemistry and Mineralogy of Manganese in the Lower Zone of the Lovozero Rare-Metal Deposit, Kola Peninsula. *Geochemistry International*. 2022;60(12):1262–1272. DOI: 10.1134/S0016702922120060
- Shroeder P. A., Le Golvan J. J., Roden M. F. Weathering of ilmenite from granite and chlorite schist in the Georgia Piedmont. *American Mineralogist*. 2002;87:1616–1625.
- Tarassova E., Tarassov M. First finds of pyrophanite and ferroan pyrophanite in Bulgaria as accessory minerals in the upper creta Granitovo-Chernozem pluton. *Proceeding of the Bulgarian Academy of Sciences*. 2012;65(1):67–74.
- Voudouris P., Xinou A., Kanellopoulos C., Kati M., Mavrogontas C., Lyberopoulos P. A new occurrence of pyrophanite from the amphibolite-hosted skarn in Western Kimmeria, Xanthi, Northern Greece. *Bulletin of the Geological Society of Greece*. 2013;47(1):487–496. DOI: 10.12681/bgsg.11027
- Warr L. N. IMA-CNMNC approved mineral symbols. *Mineralogical Magazine*. 2021;85:291–320.
- Xie L., Wang R. C., Wang D. Z., Qiu J. S. A survey of accessory mineral assemblages in peralkaline and more aluminous A-type granites of the southeast coastal area of China. *Mineralogical Magazine*. 2006;70(6):709–729. DOI: 10.1180/0026461067060362
- Zaccarini F.; Garuti G.; Ortiz-Suarez A.; Carugno-Duran A. The paragenesis of pyrophanite from Sierra de Comechingones, Córdoba, Argentina. *The Canadian Mineralogist*. 2004;42(1):155–168. DOI: 10.2113/gscanmin.42.1.155

Поступила в редакцию / Received 22.12.2025



Минералогические особенности вольфрамовых руд, влияющие на их обогатимость

В. Е. Жукова, Е. Г. Ожогина, Н. А. Сычева, Ю. Н. Шувалова

Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н. М. Федоровского (ВИМС), Москва, Россия; zhukova@vims-geo.ru

Вольфрам является дефицитным минеральным сырьем, необходимым для важнейших отраслей промышленности. Страна остро нуждается в освоении новых месторождений вольфрама. Шауырхыгская перспективная площадь на данный момент является объектом, который требует пристального изучения. Исследование состава и строения руды комплексом методов технологической минералогии (оптико-минералогический, рентгенографический, химический и электронно-микроскопический) позволило определить перспективы ее обогащения.

Ключевые слова: шеелитовая руда, шеелит, тунгстит, минералогические особенности

Mineralogical features of tungsten ores affecting their processability

V. E. Zhukova, E. G. Ozhogina, N. A. Sycheva, Y. N. Shuvalova

Fedorovsky All-Russian Research Institute of Mineral Resources, Moscow, Russia

Tungsten is a scarce mineral raw material essential for critical industries. The country is in acute need of developing new tungsten deposits. The Shauyrkhyg prospective area is currently a site that requires detailed study. Investigating the composition and structure of the ore using a set of technological mineralogy methods (optical-mineralogical, X-ray diffraction, chemical, and electron microscopy analysis) allows determining its processing prospects.

Keywords: scheelite ore, scheelite, tungstite, mineralogical features

Введение

Вольфрам относится к стратегическому минеральному сырью, перечень которого утвержден Распоряжением Правительства Российской Федерации от 30.08.2022 № 2473-р (Об утверждении..., 2022). Он необходим для производства продуктов важнейших отраслей отечественной промышленности благодаря своим специфическим характеристикам: твердости, износостойкости, стойкости к высоким температурам и высокой плотности (Хатков, Боярко, 2019). Вольфрам и продукты его передела настолько востребованы, что включены в нашей стране в перечни стратегического сырья. Запасов руд с преобладающими минералами вольфрама, вовлеченных в отработку, немного. Это связано с тем, что большинство месторождений уже в значительной степени отработано. К категории разрабатываемых относится только 4 % месторождений, 0.6 % приходится на комплексные руды, содержащие и другие полезные компоненты. 64.4 % сосредоточено в подготавливаемых к освоению и разведываемых месторождениях. В нераспределенном фонде находится 31 % запасов (по состоянию на 01.01.2023 г.). В настоящее время крайне важно иметь резервные объекты, которые могут быть оперативно лицензированы, подготовлены и введены в эксплуатацию. За счет таких месторождений может быть увеличен прирост добычи из недр в 4.5–5 раз (Государственный..., 2023; 2024).

Одним из перспективных объектов вольфрамового оруденения представляется Шауырхыгская площадь, расположенная на территории Республики Северная Осетия — Алания (РСО — Алания) Северо-Кавказского федерального округа. Вольфрамовая минерализация связана с крутопадающими кварцевыми и карбонат-кварцевыми жилами и прожилками, которые образуют линейную штокверковую зону, вытянутую в субширотном направлении. Предполагается пространственная связь вольфрамового оруденения кварц-шеелитовой формации с белореченским гранитным комплексом. Штокверковые объекты занимают в структуре минерально-сырьевой базы России ведущее положение, для них характерны значительные масштабы оруденения, но низкое качество руд (Лаптева, Чекмарев, 2024).

Целью исследования является изучение вещественного состава и морфоструктурных особенностей вольфрамовых руд Шауырхыгской площади, позволяющих прогнозировать их поведение в процессах обогащения и качество ожидаемых продуктов.

Методы исследования

Объект исследования — технологические пробы шеелитовой руды вольфрамового оруденения Шауырхыгской площади. Работы включали макроскопическое изучение, световую микроскопию, электронную микроскопию и рентгенографический количе-

Для цитирования: Жукова В. Е., Ожогина Е. Г., Сычева Н. А., Шувалова Ю. Н. Минералогические особенности вольфрамовых руд, влияющие на их обогатимость // Вестник геонаук. 2026. 2(374). С. 11–16. DOI: 10.19110/geov.2026.2.2

For citation: Zhukova V. E., Ozhogina E. G., Sycheva N. A., Shuvalova Y. N. Mineralogical features of tungsten ores affecting their processability. Vestnik of Geosciences, 2026, 2(374), pp. 11–16. DOI: 10.19110/geov.2026.2.2

ственный фазовый анализ. Все минералогические работы выполнены в ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н. М. Федоровского» в соответствии с Методическими рекомендациями Научного совета по методам минералогических исследований, входящими в «Отраслевой реестр методик анализа, допущенных к применению при минералогическом обеспечении ГРР на твердые полезные ископаемые».

Минералогические особенности вольфрамовой руды изучены методами оптической микроскопии (стереомикроскоп высшего класса Leica MZ125 (Германия) и поляризационный оптический микроскоп Olympus BX 53 (Япония)), рентгенографическим количественным фазовым анализом (рентгеновский дифрактометр Tongda TD-3700 (Dandong Tongda Science & Technology Co., Ltd., Китай. Основные параметры: монохроматизированное $\text{CuK}\alpha$ -излучение (графитовый монохроматор на дифрагированном излучении), режим работы рентгеновской трубки: $V = 40 \text{ kV}$, $I = 30 \text{ mA}$, режим записи рентгенограмм непрерывный, шаг 0.02 град 2θ , время набора импульсов 1.0 c.), электронной микроскопии (настольный сканирующий электронный микроскоп ZEM-15 (Zeptools, Китай) с энергодисперсионной приставкой. Ускоряющее напряжение 15 kV , продолжительность счета импульсов 60 c.). Химический состав руды определен комплексом методов: атомно-эмиссионного с индуктивно связанной плазмой, фотометрического, гравиметрического, титриметрического, рентгенофлуоресцентного.

Результаты и их обсуждение

Изученные пробы шеелитовой руды сформированы каменным материалом различной крупности. Кусковой материал пробы представляет собой плотные, преимущественно охристо-коричневые породы с участками белого, реже серого и черного цвета. На объекте развита кварц-шеелитовая минерализация жильного и жильно-прожилкового типов. Вмещающие породы представлены в значительной степени измененными хлорит-серицитовыми, хлорит-карбонат-кварцевыми метасоматитами с кварц-карбонатными прожилками, в различной степени катаклазированными. Отмечаются значительные хлоритизация, карбонатизация, окварцевание. Местами проявлены пренитизация и альбитизация. Преобладают массивная, полосчатая и пятнистая текстуры и разнотельная, участками микрогранобластовая структура (Жукова и др., 2025).

Химический состав пробы шеелитовой руды приведен в таблице 1.

Главным компонентом является вольфрам (0.36%), который входит в шеелит, в меньшей степени в тунгстит и штольцит. Содержание WO_3 позволяет отнести руду к рядовым.

Главными породообразующими минералами являются кварц, карбонаты и полевые шпаты. В подчиненном количестве наблюдаются пренит, хлорит, цоизит, гидроксиды железа. В количестве единичных зерен наблюдаются пирит, ильменит, слюда, каолинит, рутил, сфалерит, галенит, реальгар, аурипигмент, флюорит. Полезные минералы вольфрама представлены шеелитом, тунгститом и штольцитом, неравномерно распределенными в руде.

Таблица 1. Химический состав руды

Table 1. Chemical composition of ore

Компонент Component	Содержание, мас. % Content, wt. %
Na_2O	0.087
MgO	1.36
Al_2O_3	1.40
SiO_2	87.34
K_2O	1.11
CaO	3.80
TiO_2	0.058
V_2O_5	0.0024
Cr_2O_3	0.01
$\text{MnO}_{\text{общ}}$	0.12
$\text{Fe}_2\text{O}_3_{\text{общ}}$	2.61
SrO	0.0031
BaO	0.016
ZrO_2	0.0014
P_2O_5	0.035
FeO	1.73
SO_3	0.62
WO_3	0.36
As	0.024
Mo	<0.00005
Ni	0.0025
CuO	0.07
ZnO	0.16
Sn	<0.00005

Шеелит встречается в прожилках, сложенных кварцем и карбонатом, реже в околорудных метасоматитах. Минерал представлен двумя разновидностями. Шеелит первой разновидности образует крупные гипидиоморфные зерна и их агрегаты. Размер зерен достигает 2.4 мм , агрегатов — первых сантиметров (рис. 1, а). Для шеелита характерны следы дробления и пластических деформаций. Трещины в нем выполнены кварцем и кальцитом. Мощность трещин достигает 0.1 мм . В шеелите нередко присутствуют включения кварца размером до $0.1\text{--}0.15 \text{ мм}$. Зерна шеелита желтоватого и серовато-белого цвета с жирноватым блеском (рис. 1, б). Шеелит второй разновидности формирует мелкие идиоморфные зерна, иногда обрастающие шеелит первой разновидности. Размер зерен составляет $0.02\text{--}0.05 \text{ мм}$ (рис. 1, с, d).

Шеелит двух разновидностей различается по элементному составу (табл. 2). Для первой разновидности шеелита характерно присутствие примеси молибдена и стронция. Вторая разновидность отличается пониженным содержанием элементов-примесей. Соотношение содержаний редкоземельных элементов в шеелите зависит от генетического типа оруденения, а также от минерального состава руды (Колесникова, 2013; Иванов, 1974).

В шеелите-1 иногда наблюдаются включения и прожилки штольцита размером в тысячные доли миллиметра (рис. 2, а, б). Вероятно, штольцит возник в результате гипергенного изменения шеелита. В некоторых зернах штольцита отмечается примесь молибдена до 0.85% . Элементный состав штольцита приведен в таблице 3.

Тунгстит — продукт изменения шеелита, образует зеленовато-желтые каймы землистого сложения, реже остроугольные обломки зерен со слабым перла-

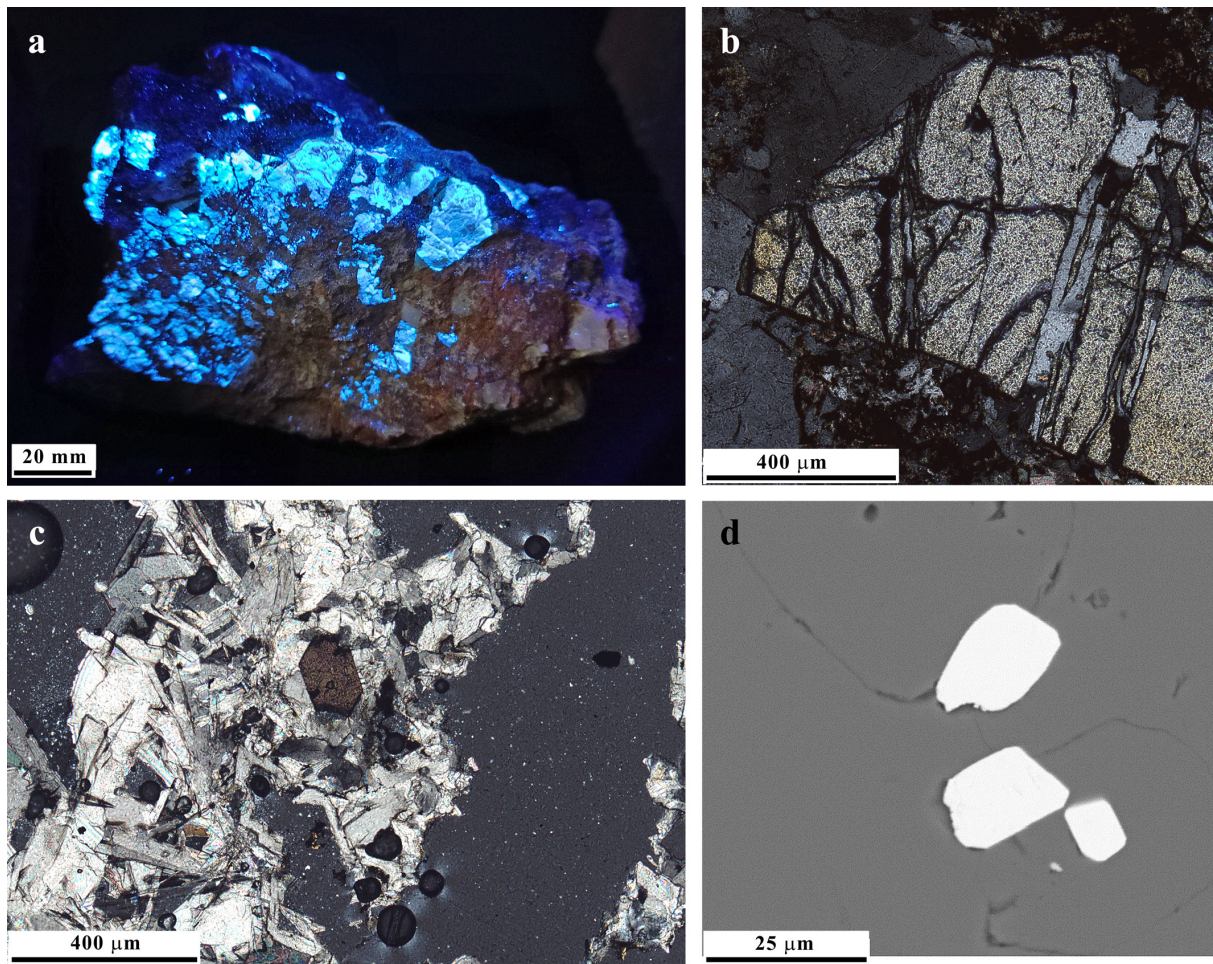


Рис. 1. Гнездообразное скопление шеелита в ожелезненном кварце под УФ-лампой (а); раздробленное зерно шеелита. Проходящий свет, николи скрещены (b); идиоморфное выделение шеелита в кальцитовом прожилке. Проходящий свет, николи скрещены (c); мелкие вкрапленные выделения шеелита в кварце. СЭМ (d)

Fig. 1. Nesting accumulation of scheelite in calcified quartz under UV lamp (a); crushed grain of scheelite. Passing light, crossed nicols (b); idiomorphic allocation of scheelite in a calcite vein. Passing light, crossed nicols (c); small interspersed scheelite precipitates in quartz. SEM (d)

Таблица 2. Элементный состав шеелита
Table 2. Elemental composition of scheelite

№	O	Ca	Cu	Sr	Mo	La	Ce	W	Сумма / Sum
Первая разновидность / First variety									
1	22.12	12.86	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	64.96	100.00
2	22.02	13.03	0.00	2.45	0.24	0.00	0.07	62.19	100.00
3	22.28	13.63	0.04	0.00	0.58	0.00	0.17	63.30	100.00
4	21.97	13.04	0.17	2.66	0.09	0.03	0.10	61.94	100.00
5	21.95	12.70	0.23	2.93	0.26	0.00	0.00	61.93	100.00
Вторая разновидность / Second variety									
6	22.12	12.97	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	64.91	100.00
7	22.13	13.08	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	64.76	100.00
8	22.11	12.91	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	64.98	100.00
9	22.14	13.16	0.00	0.05	0.00	0.03	0.07	64.55	100.00
10	22.04	12.65	0.14	0.00	0.00	0.30	0.35	64.52	100.00

мутровым блеском. В руде формирует каемки по периферии зерен шеелита и по трещинам в нем (рис. 3, a, b). Иногда в нем отмечается примесь железа (до 6.4 % Fe) (табл. 4), что позволяет предположить наличие в руде его разновидности — ферритунгстита. Для тунгстита характерна низкая твердость 1–2 по шкале Мооса, он не обладает магнитными свойствами и не флотоактивен, что приведет в перспективе к потерям ценного компонента в хвостах.

Элементный состав тунгстита приведен в таблице 4. Главным породообразующим минералом является кварц. Крупные зерна кварца носят следы пластических деформаций и в различной степени катаклизированы и перекристаллизованы. Зерна кварца запыленные, нередко пересечены тонкими карбонатными прожилками. Большинство прожилков сложены шестоватым кварцем, ориентированным поперек протяженности прожилков. По зонам тектонических на-

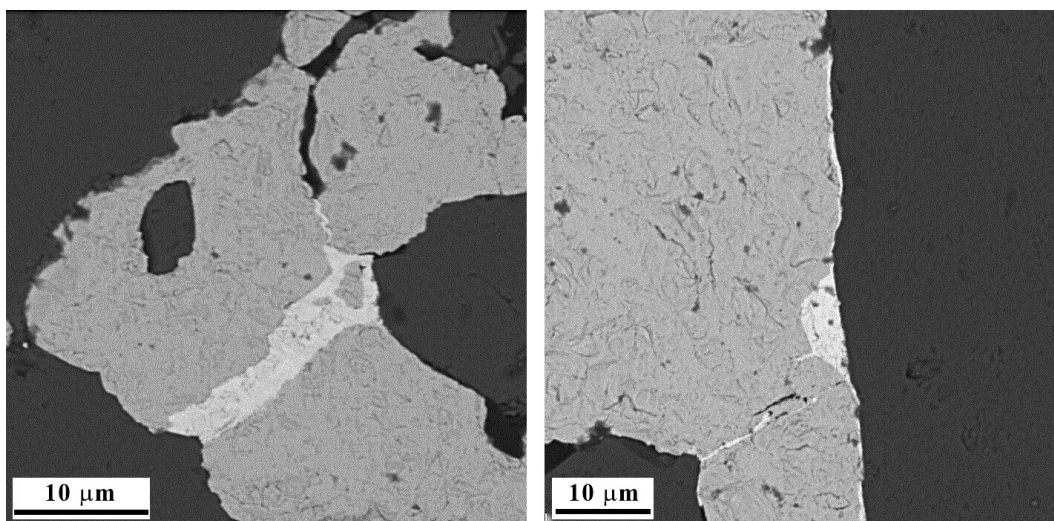


Рис. 2. Прожилки и каймы замещения штольцита (светло-серое) по шеелиту. СЭМ

Fig. 2. Veinlets and replacement rims of stolzite (light gray) after scheelite

Таблица 3. Элементный состав штольцита

Table 3. Elemental composition of stolzite

№	O	W	Pb	Сумма Sum
1	14,23	41.35	44.42	100.00
2	14.28	41.64	44.08	100.00
3	13.86	39.21	46.93	100.00
4	14.36	42.11	43.53	100.00
5	14.41	42.45	43.14	100.00

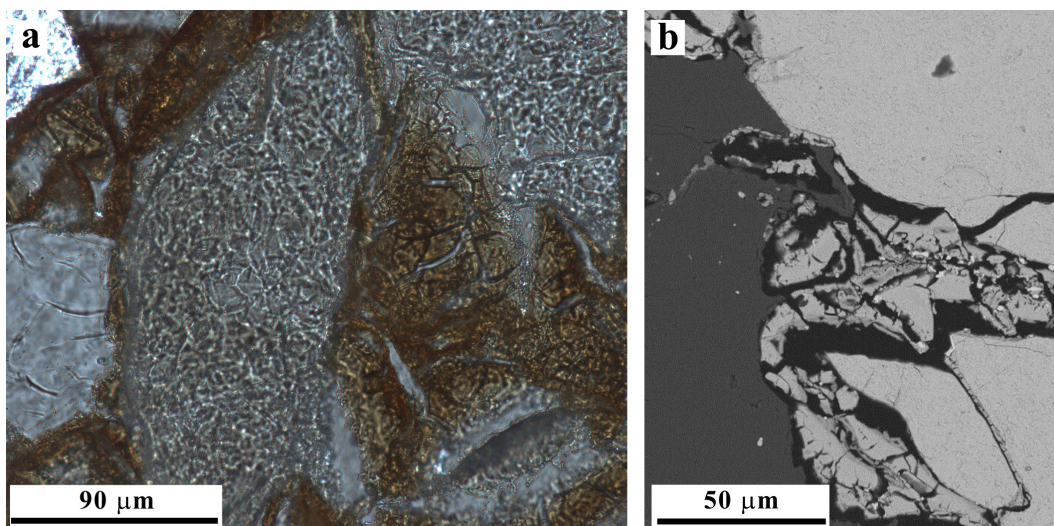


Рис. 3. Каймы тунгстита вокруг зерен шеелиита. Проходящий свет, николи параллельны (а). Изображение в обратнорассеянных электронах. СЭМ (b)

Fig. 3. Tungstite rims around scheelite grains. Transmitted light, parallel nicols (a). Image in backscattered electrons. SEM (b)

Таблица 4. Элементный состав тунгстита

Table 4. Elemental composition of tungstite

№	O	Ca	Fe	W	Сумма / Sum
1	21.56	0.00	6.40	72.04	100.00
2	21.58	1.05	5.74	71.63	100.00
3	21.50	1.28	4.93	72.29	100.00
4	21.50	1.11	5.09	72.30	100.00
5	21.51	1.29	4.97	72.23	100.00



пряжений наблюдается перекристаллизация крупных зерен кварца в тонко- и мелкозернистый агрегат зерен гранобластовой структуры. Наблюдается значительное окварцевание вмещающих пород. Наряду с кварцем присутствуют карбонаты как в виде прожилков, нередко совместно с кварцем, так и виде неравномерно проявленной карбонатизации пород. Карбонаты представлены тремя минеральными видами — кальцитом, доломитом и анкеритом. Выделения карбонатов преимущественно лапчатые, с неровными краями, слабо удлинённые. Местами отмечается «запыленность» зерен. Иногда вокруг зерен шеелита наблюдаются каймы доломита и анкерита, сменяющиеся кальцитом. В меньшем количестве отмечаются плагиоклаз, пренит, хлорит, цоизит и др.

Вредными минералами для вольфрамовых руд являются апатит, пирит, пирротин и арсенопирит. Все эти минералы встречаются эпизодически, как правило в местах наиболее интенсивно проявленных тектонических деформаций и метасоматических изменений.

Арсенопирит присутствует в виде ксеноморфных, корродированных удлинённых зерен и звездчатых тройниковых сростков. Зерна носят следы дробления. Наблюдаются сростания преимущественно с пиритом (рис. 4, а) и халькопиритом, реже арсенопирит образует каймы вокруг зерен пирротина. Пирротин отмечается в виде удлинённых ксеноморфных выделений размером в сотые доли миллиметра. Зерна пирротина, как правило, кавернозные, с извилистыми грани-

цами. Апатит образует единичные изометричные зерна размером до 0.4 мм по удлинению, со следами кристаллографической огранки (рис. 4, б), неравномерно рассеянные в кварце. Нередко носит следы дробления.

Минералогическое изучение характера раскрытия рудных и породообразующих минералов проводилось в классах ситового анализа (мм): $-5+2$, $-2+1$, $-1+0.5$, $-0.5+0.3$, $-0.3+0.1$, $-0.1+0.074$, $-0.074+0.044$. В каждом классе были выделены и количественно оценены четыре основных типа минеральных сростков, отличающихся по содержанию шеелита (%): индивидуализированные (свободные) рудные зерна (91—100); богатые (71—90); рядовые (31—70); бедные (6—30). Свободные зерна породообразующих минералов не учитывались. В таблице 5 показано раскрытие шеелита без учета породообразующих минералов.

Четко прослеживается увеличение условно свободных зерен рудного минерала от крупных классов к тонким. В классе крупности ($-0.074+0.044$) мм раскрытие шеелита составляет 99 %, а в классе крупности ($-0.044+0.02$) мм зерна шеелита полностью раскрыты.

Свободные зерна представляют собой фрагменты зерен шеелита. Богатые зерна образованы шеелитом и преимущественно кварцем. Сростки кварца или карбонатов с шеелитом, присутствующим в них в подчиненном количестве, относятся к категории рядовых и бедных. Минеральные зерна породообразующих минералов (кварц, карбонаты, полевые шпаты, пренит, слюда, реже гидроксиды железа и обломки сланцев) в подсчет не включены.

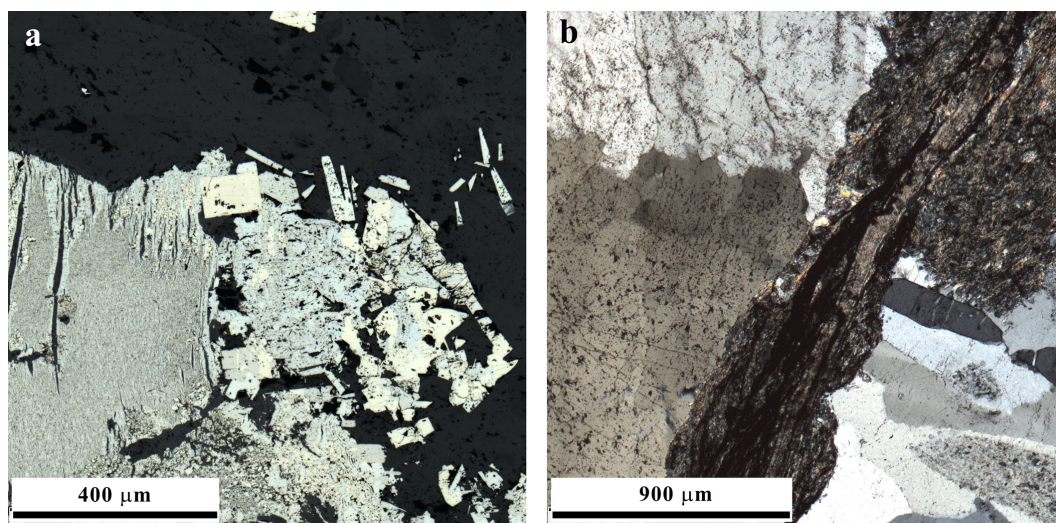


Рис. 4. Агрегат пирита и арсенопирита. Отраженный свет, николи параллельны (а). Удлинённые зерна апатита в кварце. Проходящий свет, николи скрещены (б)

Fig. 4. Pyrite and arsenopyrite aggregate. Reflected light, parallel nicols (a). Elongated grains of apatite in quartz. Passing light, crossed nicols (b)

Таблица 5. Распределение типов сростков по классам крупности исходной руды без учета нерудных минералов, %

Table 5. Distribution of splice types by size classes of the initial ore, excluding non-metallic minerals, %

Тип сростков Type of splices	Класс крупности, мм / Size class, mm							
	$-2+1$	$-1+0.5$	$-0.5+0.3$	$-0.3+0.2$	$-0.2+0.1$	$-0.1+0.074$	$-0.074+0.044$	$-0.044+0.02$
Свободные / Free	0	63	72	91	96	97	99	100
Богатые / Rich	0	0	3	0	3	2	0	0
Рядовые / Ordinary	0	12	7	4	0	0	0	0
Бедные / Low	100	25	18	5	1	1	1	0
Сумма / Sum	100	100	100	100	100	100	100	100

Выводы

Проведенные исследования показали, что морфологические особенности руд, в том числе характер распределения, выделения, гранулярный состав вольфрамовых минералов (шеелит, тунгстит, штольцит), позволяют с большой долей вероятности говорить об их поведении в процессах обогащения и качестве ожидаемых продуктов. В результате были выделены две группы факторов, влияющих на обогащение:

— положительные: чистые (практически без включений породообразующих минералов) зерна шеелита, размеры его выделений и то, что шеелит образует сростки открытого типа, которые могут быть легко раскрыты;

— отрицательные: трещиноватость зерен шеелита, наличие двух разновидностей шеелита, отличающихся размером зерен, одновременное присутствие нескольких минеральных форм вольфрама (шеелит, тунгстит, штольцит); сюда же относятся каймы и прожилки тунгстита, который в настоящее время считается неизвлекаемым минералом; присутствие вредных минералов — апатита, пирита, арсенопирита, пирротина — и большого количества кальцийсодержащих минералов (карбонатов и флюорита) в руде, близких по флотационным свойствам к шеелиту; наличие в руде галенита и штольцита, с которыми связан свинец, являющийся вредной примесью для вольфрамовых руд (Методические..., 2007).

Авторы выражают благодарность главному геологу АО «Северо-Кавказское ПГО» О. П. Туаеву за предоставленные материалы и ценные советы.

Литература / References

Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2022 году. М., 2023. 640 с.

State report on the state and use of mineral resources of the Russian Federation in 2022. Moscow; 2023. 640 p. Russian.

Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2023 году. М., 2024. 716 с.

State report on the state and use of mineral resources of the Russian Federation in 2023. Moscow; 2024. 716 p. Russian.

Об утверждении перечня основных видов стратегического минерального сырья: Распоряжение Правительства Российской Федерации от 30.08.2022 № 2473-р.

On approval of the list of main types of strategic mineral raw materials. Russian: Order of the Government of the Russian Federation dated August 30, 2022:2473-r.

Жукова В. Е., Ожогина Е. Г., Шувалова Ю. Н., Сычева Н. А. Особенности минерального состава, определяющие обогатимость вольфрамовых руд // Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки природного и нетрадиционного минерального сырья (Плаксинские чтения — 2025). Екатеринбург: Форт-Диалог Исет, 2025. С. 112—115; DOI: 10.21440/978-5-6047797-5-0-2025-3-510

Zhukova V. E., Ozhogina E. G., Shuvalova Yu. N., Sycheva N. A. Features of the mineral composition that determine the beneficiation of tungsten ores. In: Innovative processes of complex and deep processing of natural and non-traditional mineral raw materials (Plaksin Readings 2025). Yekaterinburg: Fort-Dialog Iset; 2025. p. 112—115. Russian.

Иванов Ю. Г. Геохимические и минералогические критерии поисков вольфрамового оруденения. М.: Недра, 1974. 213 с.

Ivanov Yu. G. Geochemical and mineralogical criteria for searching for tungsten mineralization. Moscow: Nedra; 1974. 213 p. Russian.

Колесникова Н. Б. Редкие земли в шеелитах как типоморфный признак генетико-формационного типа руд // Рациональное освоение недр. № 1. 2013. С. 32—34. Kolesnikova N. B. Rare earths in scheelites as a typomorphic feature of the genetic-formational type of ores. Rational development of subsoil. 2013;1:32—34. Russian.

Лаптева А. М., Чекмарев К. В. Минерально-сырьевая база вольфрама России: состояние и перспективы развития // Разведка и охрана недр. № 5. 2024. С. 3—16. DOI: 10.53085/0034-026X_2024_5_03

Lapteva A. M., Chekmarev K. V. Mineral resource base of tungsten in Russia: state and development prospects. Exploration and Protection of Subsurface Resources. 2024;5:3—16. Russian.

Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Вольфрамовые руды. М., 2007. 43 с.

Methodological recommendations for the application of the Classification of deposit reserves and predicted resources of solid minerals. Tungsten ores. Moscow; 2007. 43 p. Russian.

Хатков В. Ю., Боярко Г. Ю. Современное состояние вольфрамовой промышленности России // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330. № 2. 124—137.

Khatkov V. Yu., Boyarko G. Yu. Current state of the tungsten industry in Russia. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2019;330(2):124—137. Russian.

Поступила в редакцию / Received 30.01.2026

**Биоинералогический анализ мочевых камней человека****В. И. Силаев¹, А. А. Слюсарь², А. В. Слюсарь³, А. В. Кокин⁴, А. С. Шуйский¹, А. Ф. Хазов¹,
С. Н. Шанина¹, Б. А. Makeev¹, И. В. Смолева¹, Д. В. Киселева⁵**¹ Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия; *silaev@geo.komisc.ru*² РНИМУ им. Н. И. Пирогова, Москва, Россия³ РКБ ЮОМЦ ФМБА, Ростов на Дону, Россия⁴ РАНХиГС при Президенте РФ, Ростов на Дону, Россия⁵ Институт геологии и геохимии УрО РАН, Екатеринбург, Россия

С использованием широкого спектра современных экспериментальных методов исследования была изучена эталонная коллекция образцов мочевых камней у мужчин и женщин в возрасте 27–83 лет, а также мочи пациентов с мочекаменной болезнью и хроническим пиелонефритом. Были проанализированы химический и фазовый состав, содержание микроэлементов, аминокислотный состав и содержание в белках, а также изотопный состав углерода и азота. В мочевых камнях были обнаружены биоинералы, охватывающие практически весь современный спектр типов минералов: элементарные вещества (металлы), халькогениды (сульфиды), галогениды (хлориды), оксиды (магнетит, фаза SiO₂), силикаты (алюмосиликаты) и кислородные соли. Помимо минералов камни также содержат так называемые минералоиды, представленные водными оксалатами кальция и мочевой кислотой. В исследованных образцах было идентифицировано пятнадцать белковых аминокислот, в том числе семь незаменимых. Три аминокислоты содержат небольшое количество D-энантиомера. Изотопный состав углерода и азота в органическом веществе, содержащемся в камнях и моче человека, уникален и отличается от состава органического вещества, содержащегося в костях человека, атмосфере Земли и в осадочных породах. Однако мочевые камни имеют сходство по изотопному составу углерода с органическими полимерами, образующимися в результате современного вулканизма.

Ключевые слова: мочевые камни, минералообразование в организме человека, биоинералы**Bioineralogical analysis of human urinary stones****V. I. Silaev¹, A. A. Slyusar², A. V. Slyusar³, A. V. Kokin⁴, A. P. Shuisky¹, A. F. Khazov¹,
S. N. Shanina¹, B. A. Makeev¹, I. V. Smoleva¹, D. V. Kiseleva⁵**¹ Institute of Geology Komi SC UB RAS, Syktyvkar, Russia² Pirogov Russian National Research Medical University, Moscow, Russia³ Rostov Clinical Hospital, Southern District Medical Center of the Federal Medical and Biological Agency of Russia, Rostov-on-Don, Russia⁴ South-Russian Institute of Management, Presidential Academy, Rostov-on-Don, Russia⁵ Institute of Geology and Geochemistry UB RAS, Yekaterinburg, Russia

We present a study of a reference collection of urinary stone samples from men and women aged 27–83 years, as well as urine from patients with urolithiasis and chronic pyelonephritis, using a wide range of modern experimental research methods. The chemical and phase composition, trace element content, amino acid composition and content in proteins, and the isotopic composition of carbon and nitrogen are analyzed. Bioineralogical analysis of urinary stones, covering virtually the entire modern range of mineral types: elementary substances (metals), chalcogenides (sulfides), halides (chlorides), oxides (magnetite, SiO₂ phase), silicates (aluminosilicates), and oxygen salts. In addition to minerals, the stones also contain so-called mineraloids, represented by hydrous calcium oxalates and uric acid. Fifteen protein amino acids, including seven essential ones, are identified in the studied samples. Three amino acids contain a small amount of the D-enantiomer. The isotopic composition of carbon and nitrogen in organic matter found in human stones and urine is unique and differs from that found in human bones, the Earth's atmosphere, and sedimentary rocks. However, urinary stones share a carbon isotopic composition similar to organic polymers formed by modern volcanism.

Keywords: urinary stones, mineral formation in the human body, bioineralogical**Введение**

Мочекаменная болезнь — широко распространённое заболевание, выражающееся в образовании в поч-

ках и мочевыводящих путях так называемых мочевых камней (уролитов). Считается, что основной причиной такого заболевания является нарушение обмена

Для цитирования: Силаев В. И., Слюсарь А. А., Слюсарь А. В., Кокин А. В., Шуйский А. С., Хазов А. Ф., Шанина С. Н., Makeev Б. А., Смолева И. В., Киселева Д. В. Биоинералогический анализ мочевых камней человека // Вестник геонаук. 2026. 2(374). С. 17–46. DOI: 10.19110/geov.2026.2.3

For citation: Silaev V. I., Slyusar A. A., Slyusar A. V., Kokin A. V., Shuisky A. P., Khazov A. F., Shanina S. N., Makeev B. A., Smoleva I. V., Kiseleva D. V. Bioineralogical analysis of human urinary stones. Vestnik of Geosciences, 2026, 2(374), pp. 17–46. DOI: 10.19110/geov.2026.2.3

веществ в организме, особенно водно-солевого обмена, и нарушения кислотно-щелочного равновесия в крови и других жидкостях организма человека вследствие инфекционных заболеваний печени и желудочно-кишечного тракта (Севостьянова, Полиенко, 2004). Заболевания желез внутренней секреции, регулирующих водный и солевой обмен (щитовидная железа, паращитовидные железы, гипофиз), также играют значительную роль в возникновении мочекаменной болезни. Развитию заболевания способствует состав пищи, например, растительно-молочная пища приводит к ощелачиванию урины, мясная, наоборот, к повышению её кислотности. Способствует возникновению мочекаменной болезни и недостаточное содержание в пище витаминов А и D. В конечном счете все упомянутые факторы приводят к возникновению у людей биоминерализации (Мак-Коннелл, 1977) вследствие кристаллизации в урине слаборастворимых солей. При нарушении физиологического равновесия, приводящем к снижению растворимости в жидкостях организма человека, из нее выделяются и начинают расти твердые зародыши, формируясь в разноразмерные органо-минеральные образования — объекты биоминералогических исследований (Бородулин, Глыбочко, 2009; Брик, Радчук, 2007; Волков, Волкова, 2004; Каткова, 1996; Каткова, Боровкова, 2007; Козловский, 1973; Кокин, 2020; Колониченко, 2007; Кораго, 1992; Полиенко, Ермолаев, 1996; Полиенко, Севостьянова, 2003, 2010, 2012; Полиенко, Шубин, 1997; Силаев, Кокин, 2017, 2021; Силаев, Пономарев, 2016; Сребродольский, 1983; Юшкин, 1999, 2002, 2006, 2007).

В настоящее время установлено, что абсолютное большинство уролитов имеет сложный фазовый состав (Боровкова, Филиппов, 2009; Козловский, 1973; Лебедев, Смирнова, 2021; Нигматулина, Сокол, 2004; Ракин, Каткова, 2006; Севостьянова, Полиенко, 2004). К числу наиболее часто встречающихся минералоподобных фаз относятся оксалаты кальция — узеллит и узеллит; урициты (мочевая кислота); фосфаты — брушит, струвит, ньюберит, бабьеррит, гопеит, биоапатит; сульфаты — гипс и др. Среди смешаннофазных камней наиболее распространены мочекислотно-оксалатные, фосфато-оксалатные, фосфатомочекислотные. Очевидно, что уже достигнутый уровень изученности уролитов не является окончательным и может быть существенно повышен благодаря непрерывно развивающимся методам экспериментальных минералогических исследований.

Объекты и методы исследований

В качестве объектов наших исследований (табл. 1) выступили: 1) 12 образцов *мочевых камней* мужчин и женщин в возрасте 27–83 лет с максимальным размером (5.5 ± 2.3) мм ($V_x = 43\%$) и массой (160.9 ± 201.4) мг ($V_x = 125\%$); 2) сопряженные с камнями 10 образцов *мочи-1*; 3) два дополнительных образца *мочи-2* пациентов с пиелонефритом. В ходе исследований был использован широкий комплекс методов: оптическая микроскопия (компьютеризированный комплекс OLYMPUS BX51); химический анализ горных пород; определение содержания $C_{орг}$ методом кулонометрического титрования по величине pH на анализаторе Ан-7529М; термический анализ на автоматическом

дериватографе Shimadzu DTG-60A/60AH; рентгеноструктурный анализ с использованием дифрактометра Shimadzu XRD-6000; ИК-спектроскопия с применением прибора «Люмекс ИнфраЛИУМ ФТ-02»; раман-спектроскопия с использованием прибора Horiba LabRam HR 800; ЭПР на спектрографе SE/X-2547; рентгенолюминесцентная спектроскопия на основе рентгенолюминесцентного аппарата УРС-1.0 (трубка БСВ-2, Ферантикатод, напряжение на катоде 50 кВ, анодный ток 14 мА), монохроматора ААС-1 (Carl Zeiss, Jena) и регистрирующего узла с ФЭУ-106; аналитическая сканирующая электронная микроскопия с применением комплекса Jeol JSM-6400; рентгенофлуоресцентный анализ на ЭД-спектрометре MESA-500W; определение изотопного состава углерода и азота в углеродистом веществе на аналитическом комплексе Flash EA, соединенном с масс-спектрометром Delta V Advantage; газовая пирохроматография с использованием пиро-литического устройства и хроматографа «Цвет-800»; масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой с использованием масс-спектрометра ELAN 9000 (Perkin Elmer). ИСП-МС-анализы на микроэлементы в образцах мочи выполнены в ЦКП «Геоаналитик» Института геологии и геохимии УрО РАН в рамках госбюджетной темы № 123011800012-9.

Для определения содержания аминокислот в белках мочи 1.0 мл пробы помещали в пробирку Eppendorf, добавляли 0.4 мл 40 % раствора трихлоруксусной кислоты (ТХУ) и встряхивали в течение 10 мин. Для отделения белков, выпадающих в осадок, пробирки помещали в микроцентрифугу и подвергали вращению со скоростью 12000 об./мин в течение 5 мин. Супернатант аккуратно сливали. Белковый осадок промывался от ТХУ, для чего к нему добавляли 1 мл смеси метанола и диэтилового эфира в объемной пропорции 1:1. Пробирка подвергалась встряхиванию в течение 1 мин, после чего ее центрифугировали с последующим аккуратным сливанием супернатанта. Операция повторялась трижды. Дальнейшая методика анализа аминокислот была стандартной.

Объекты для исследований были представлены ассистентом кафедры терапии медико-биологического факультета РНИМУ им. Н. И. Пирогова А. А. Слюсарь и врачом-урологом высшей категории Ростовской клинической больницы ЮОМЦ ФМБА России А. В. Слюсарем. В число этих объектов вошли пять образцов мочевых камней и скоррелированные с ними пять образцов мочи мужчин в возрасте 27–71 лет (в среднем 52 года), а также пять образцов мочевых камней и мочи женщин в возрасте 40–83 лет (в среднем 64 года). Масса камней: у мужчин — 236.7 ± 235.9 мг (у более пожилых камни массивнее); у женщин — 104.8 ± 137.2 мг (у более пожилых камни менее массивные). Кроме того, исследовались два образца мочи пациентов с хроническим пиелонефритом. Все образцы мочи варьировались по окраске от бесцветных до бурых.

Морфология, внутреннее строение и химико-фазовый состав

Исследованные мочевые камни характеризовались преимущественно светлой окраской и округлой формой, не обнаруживая корреляции ни с возрастом больных, ни с местом извлечения камней, ни с их раз-



Таблица 1. Реестр пациентов с мочекаменной болезнью (1–10), хроническим пиелонефритом (11, 12) и общая характеристика объектов исследований

Table 1. Registry of patients with urolithiasis (1-10), chronic pyelonephritis (11, 12) and general characteristics of the study subjects

№	Пациент / Patient	Объекты исследований / Research objects		Параметры конкрементов Stone parameters	
		конкременты / stones	моча / urine	размеры, мм dimensions, mm	масса, мг weight, mg
1	Женщина, 40 лет Female, 40 years old	из правой почки, изометричный темно-бурый from the right kidney, isometric dark brown	буровато-желтая brownish-yellow	10 × 3.5 × 6.7	335.5
2	Мужчина, 60 лет Male, 60 years old	из мочевого пузыря, изометричный светло-бурый from the bladder, isometric light brown	бесцветная colorless	4 × 1.6 × 2.1	616.2
3	Женщина, 82 года Female, 82 years old	из левой почки, угловатый светлый from the left kidney, angular light	буроватая brownish	5.1 × 5 × 4.9	21
4	Мужчина, 71 год Male, 71 years old	из левой почки, угловатый и изометричный серый from the left kidney, angular and isometric gray	бурая brown	6.9 × 3.9 × 5.3	200
5	Мужчина, 27 лет Male, 27 years old	из правой почки, вытянутый желтый from the right kidney, elongated yellow	бесцветная colorless	3.6 × 3.5 × 3.5	2.7
6	Женщина, 83 года Female, 83 years old	из левой почки, угловатый светлый from the left kidney, angular, light-colored	бесцветная colorless	7.8 × 7 × 6.5	2.7
7	Мужчина, 65 лет Male, 65 years old	из мочевого пузыря, угловатый светлый from the bladder, angular, light-colored	светло-желтая light yellow	6.4 × 5.6 × 3.4	284.3
8	Мужчина, 35 лет Male, 35 years old	из правой почки, округлый и угловатый светлый from the right kidney, round and angular, light-colored	бесцветная colorless	8 8 × 8 × 7	94.5
9	Женщина, 70 лет Female, 70 years old	из левой почки, неправильной формы, светлый from the left kidney, irregularly shaped, light-colored	светло-желтая light yellow	5.3 × 5.1 × 5	40
10	Женщина, 44 года Female, 44 years old	из правой почки, неправильной формы, светлый from the right kidney, irregularly shaped, light-colored	желтая yellow	2.9 × 2.5 × 2.5	12.5
11	Женщина, 50 лет Female, 50 years old	н. о.	буроватая brownish	н. о.	н. о.
12	Мужчина, 56 лет Male, 56 years old	н. о.	светло-желтая light yellow	н. о.	н. о.

н. о. — не обнаружено (здесь и далее) / not detected (from now on)

мером (рис. 1). Уролиты широко варьировались по внутреннему строению благодаря сочетанию участков со скрытокристаллической, микрозернистой, пластинчатой, лучистой, лучисто-слоистой структурами (рис. 2–11), что вообще характерно для таких образований (Боровкова, 2004).

По валовому составу исследуемые камни близки к составу карбонатапатита, но по результатам рентгеноспектрального микронзондового анализа (табл. 2) в их составе выявлено до 14 фаз (в последовательности снижения частоты встречаемости, %): 1) органическое вещество, включая эритроциты и урициты (100); 2) водные кальциевые оксалаты (100); 3) силикаты и алюмосиликаты (90); 4) металлоорганические соединения (80); 5) самородные металлические фазы (60); 6) водород (H)-сульфаты и фосфаты (60); 7) биоаптит (40); 8) эритроциты (30); 9) фосфато-сульфаты ба-

рия (30); 10) сульфиды (10); 11) гидроксид (OH)- и гидроксен-хлориды (20); 12) сульфато-силикатофосфаты (10); 13) магнетит (10); 14) кремниевая (SiO₂) фаза (10). По данным рентгеноструктурного анализа, часть микрофаз в составе исследованных камней характеризуется кристаллическостью. В число таких фаз входят (d, в скобках индексы hkl):

Вевелит, CaC₂O₄·H₂O = 5.94–5.95 (10–1); 5.81 (110); 4.78 (200); 4.53 (101); 3.78 (21–1); 3.64–3.65 (020); 3.11 (12–1); 2.97 (10–2); 2.91 (310); 2.84 (121); 2.49 (112); 2.52 (301); 2.49–2.51 (112); 2.45 (31–2); 2.42 (32–1); 2.38 (400); 2.35 (130); 2.30 (11–2); 2.26 (202); 2.24 (031); 2.21 (40–2); 2.13 (23–1); 2.09 (10–3); 2.08 (321); 1.996 (50–1); 1.976–1.978 (30–3); 1.95 (411); 1.933 (013); 1.890 (42–2); 1.858 (312); 1.845 (610); 1.837 (510); 1.824 (040); 1.814 (12–3); 1.793 (132); 1.737 (32–3); 1.691 (520); 1.639 (213); 1.589 (600); 1.573 (20–4); 1.573 (20–4); 1.548–1.549 (033).

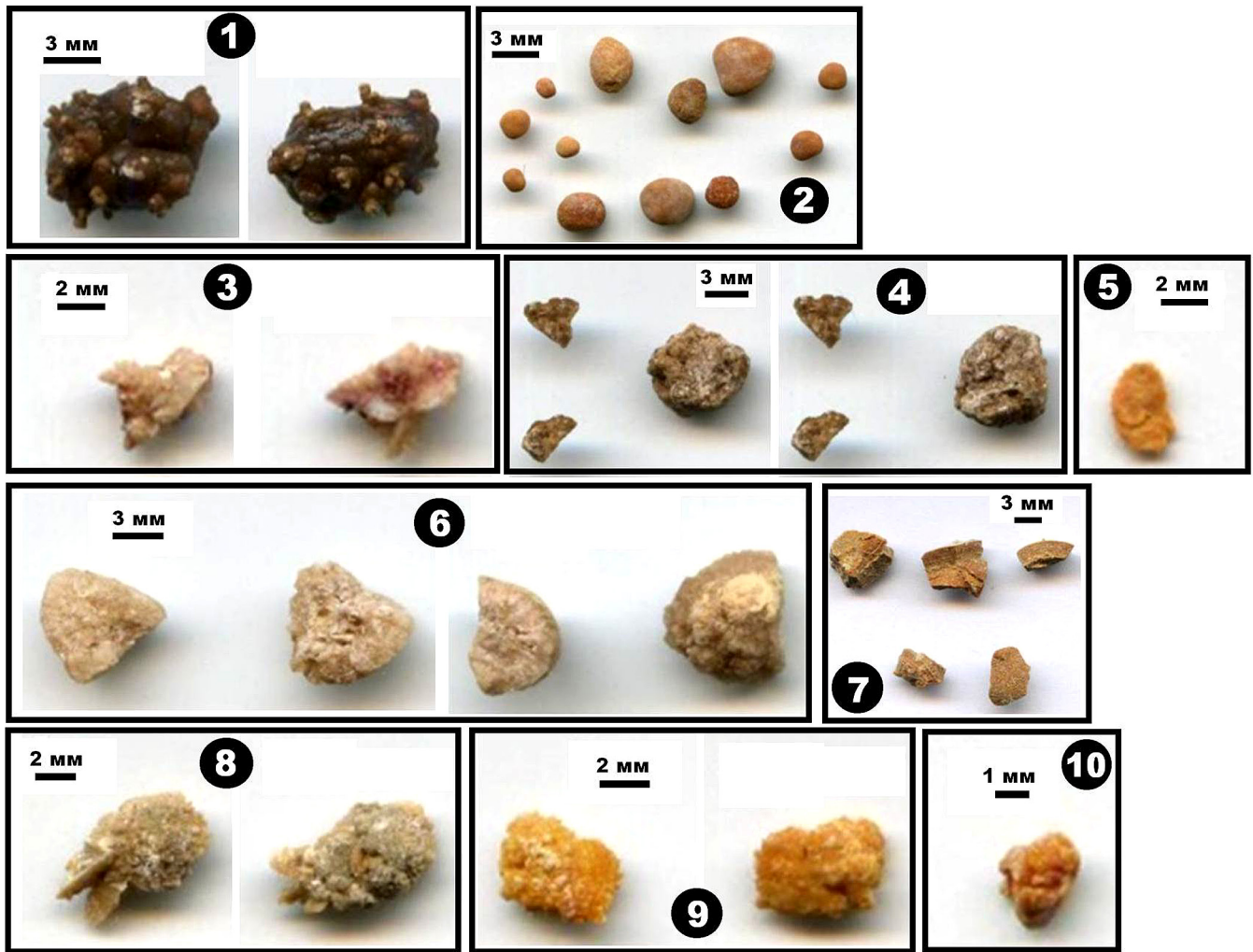


Рис. 1. Фотоизображения исследуемых мочевых камней. Номера изображений совпадают с номерами образцов в табл. 1

Fig. 1. Images of the studied urinary stones. The image numbers correspond to the sample numbers in Table 1

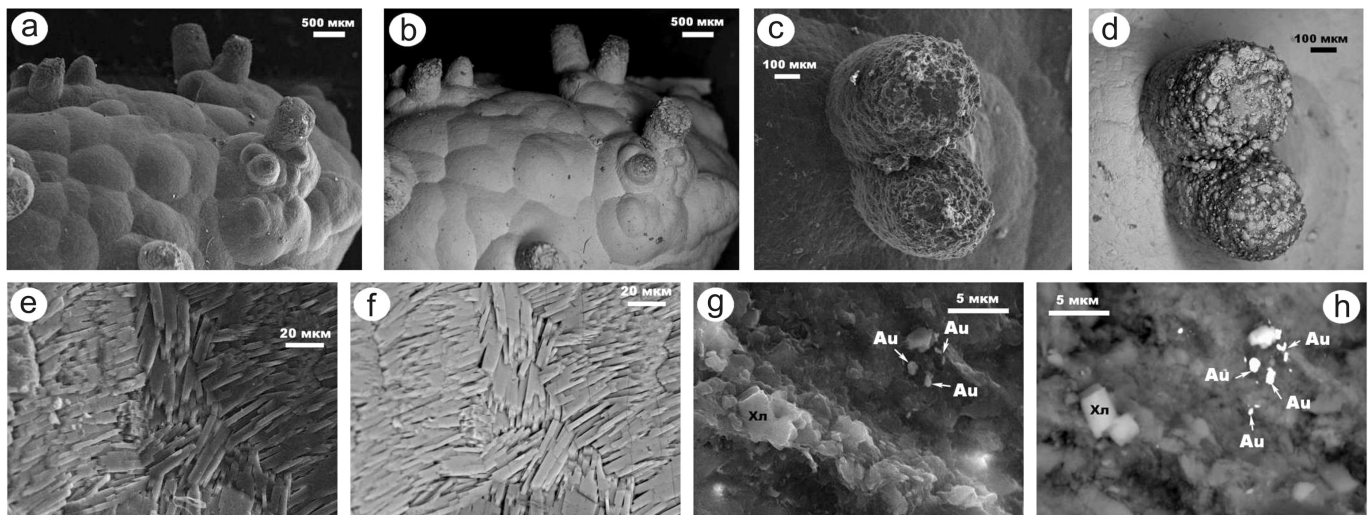


Рис.2. СЭМ-изображения внутреннего строения обр. № 1 мочевых камней в режимах вторичных (а, с, е, г) и упруго-отраженных (b, d, f, h) электронов. Фазы: Au — выделения самородного золота

Fig. 2. SEM images of the internal structure of urinary stones of sample No. 1 in the secondary (a, c, e, g) and elastically reflected (b, d, f, h) electron modes. Phases: Au — native gold precipitates

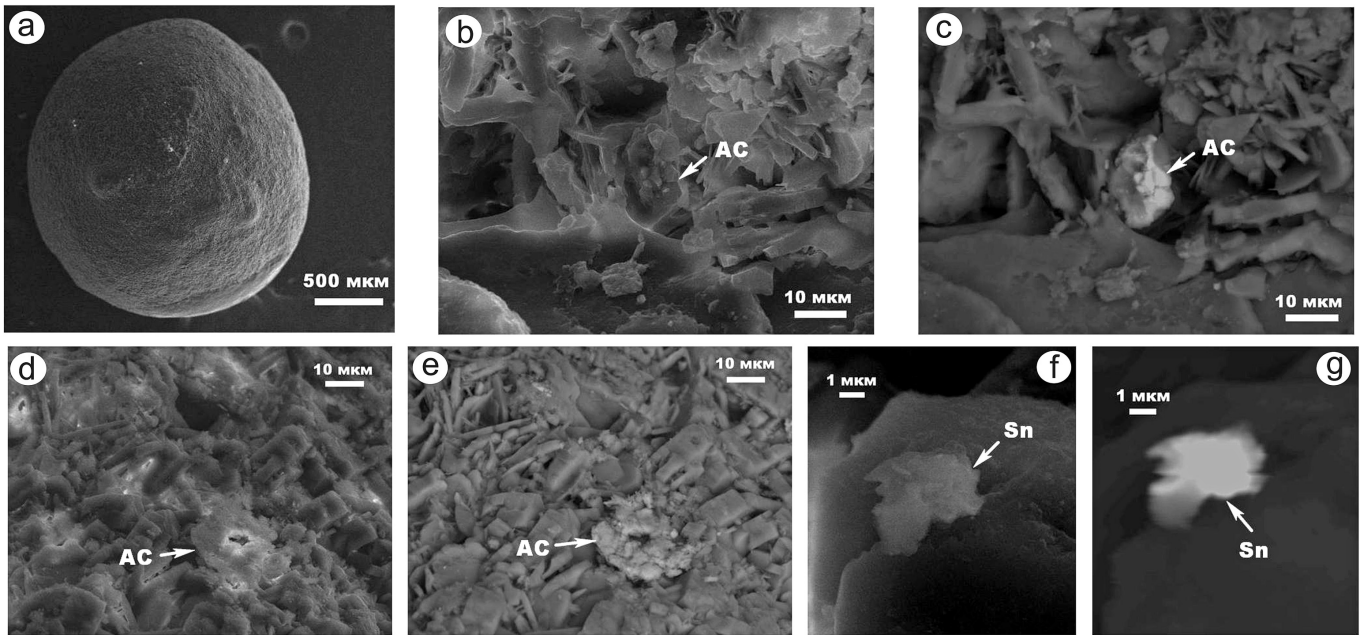


Рис. 3. СЭМ-изображения внутреннего строения обр. № 2 мочевых камней в режимах вторичных (a, b, d, f) и упруго-отраженных (c, e, g) электронов. Фазы: AC — силикаты и алюмосиликаты, Sn — выделения самородных металлов

Fig. 3. SEM images of the internal structure of urinary stones of sample No. 2 in the modes of secondary (a, b, d, f) and elastically reflected (c, e, g) electrons. Phases: AC — silicates and aluminosilicates, Sn — precipitates of native metals

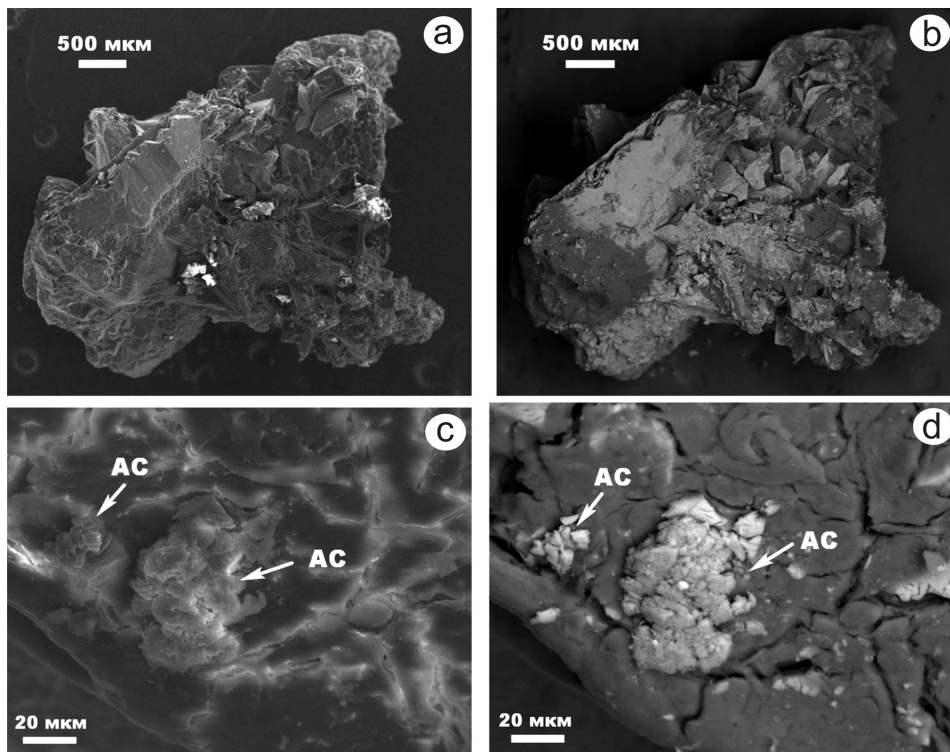


Рис. 4. СЭМ-изображения внутреннего строения обр. № 3 мочевых камней в режимах вторичных (a, c) и упругоотраженных (b, d) электронов. Фазы: AC — силикаты и алюмосиликаты

Fig. 4. SEM images of the internal structure of urinary stones of sample No. 3 in the secondary (a, c) and elastically reflected (b, d) electron modes. Phases: AC — silicates and aluminosilicates

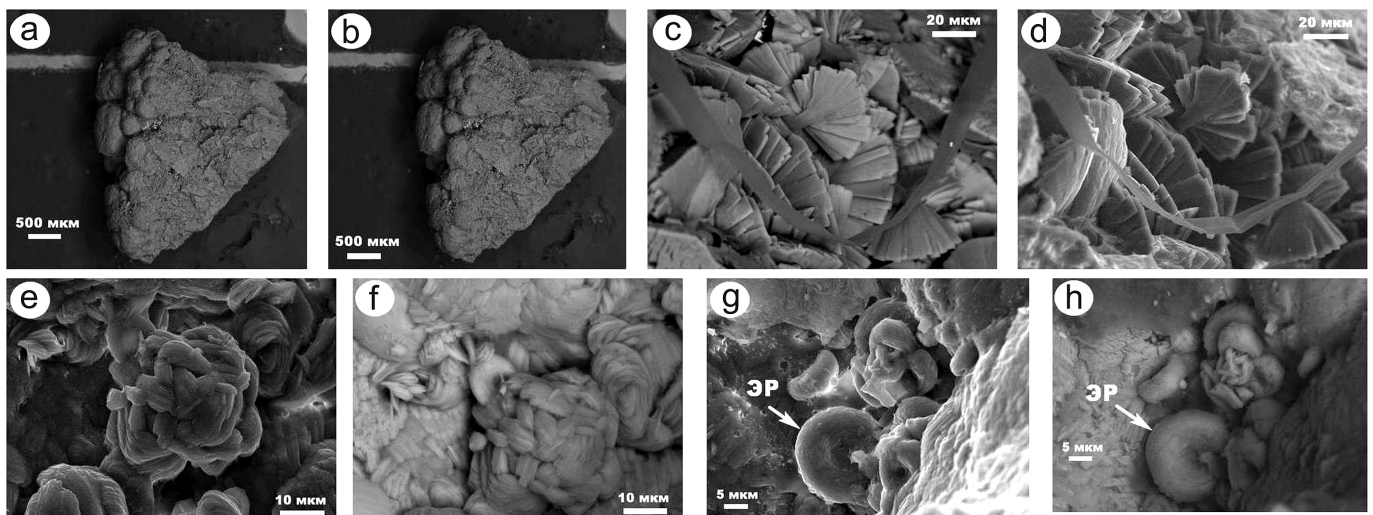


Рис. 5. СЭМ-изображения внутреннего строения образца № 4 мочевых камней в режимах вторичных (а, с, е, г) и упругоотраженных (b, d, f, h) электронов. Фазы: ЭР — эритроциты

Fig. 5. SEM images of the internal structure of urinary stones of sample No. 4 in the secondary (a, c, e, g) and elastically reflected (b, d, f, h) electron modes. Phases: ЭР — erythrocytes

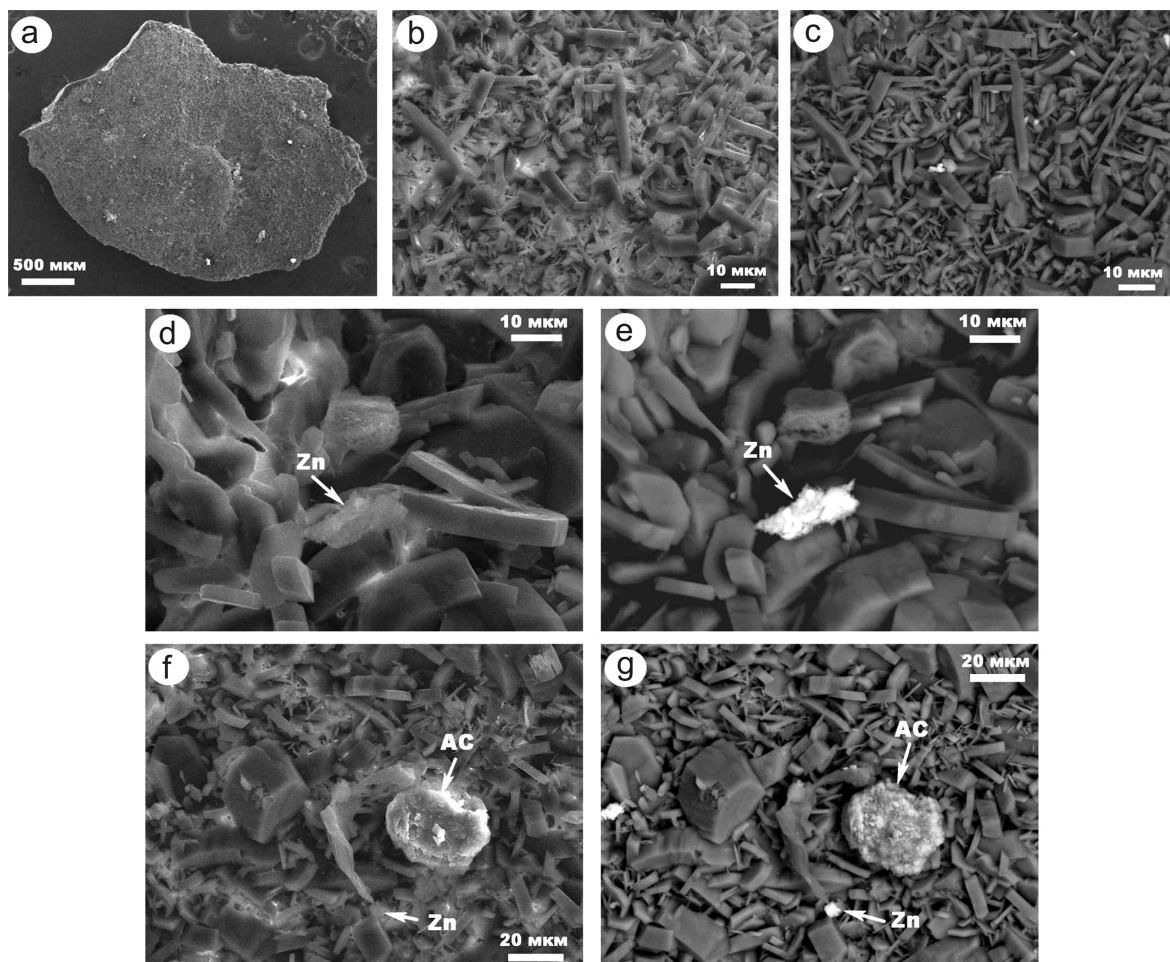


Рис. 6. СЭМ-изображения внутреннего строения обр. № 5 мочевых камней в режимах вторичных (а, b, d, f) и упругоотраженных (с, е, г) электронов. Фазы: AC — силикаты и алюмосиликаты, Zn — выделение самородных металлов

Fig. 6. SEM images of the internal structure of urinary stones of sample No. 5 in the secondary (a, b, d, f) and elastically reflected (c, e, g) electron modes. Phases: AC — silicates and aluminosilicates, Zn — native metal precipitation

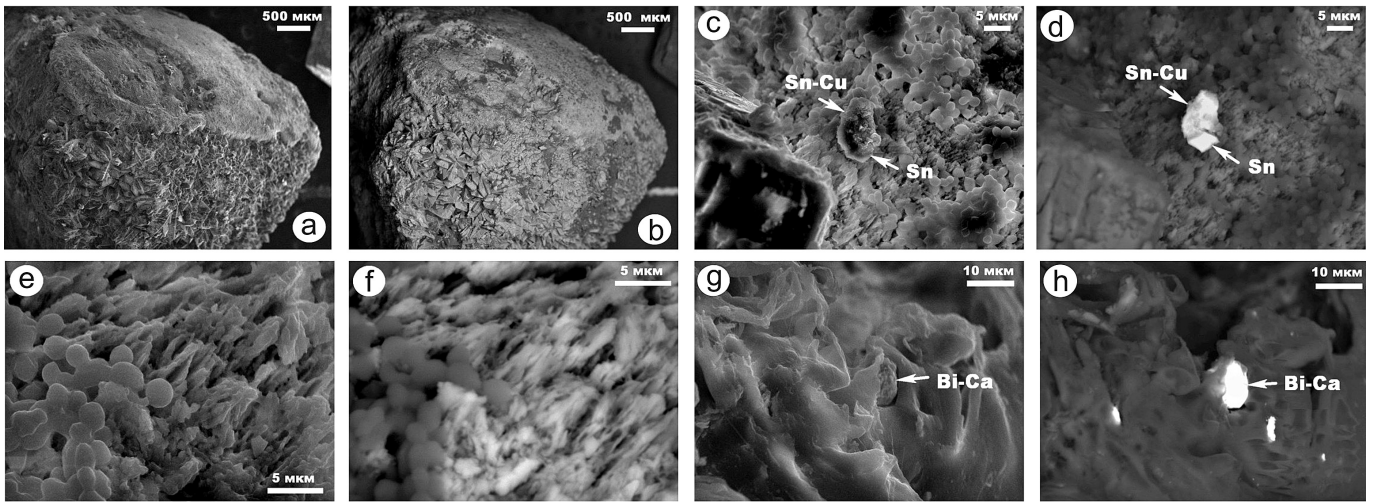


Рис. 7. СЭМ-изображения внутреннего строения обр. № 6 мочевых камней в режимах вторичных (а, с, е, г) и упруго-отраженных (b, d, f, h) электронов. Фазы: Sn-Cu и Sn – выделения самородных металлов; Bi-Ca – металлоорганические соединения

Fig. 7. SEM images of the internal structure of urinary stones of sample No. 6 in the secondary (a, c, e, g) and elastically reflected (b, d, f, h) electron modes. Phases: Sn-Cu and Sn are precipitates of native metals; Bi-Ca are organometallic compounds

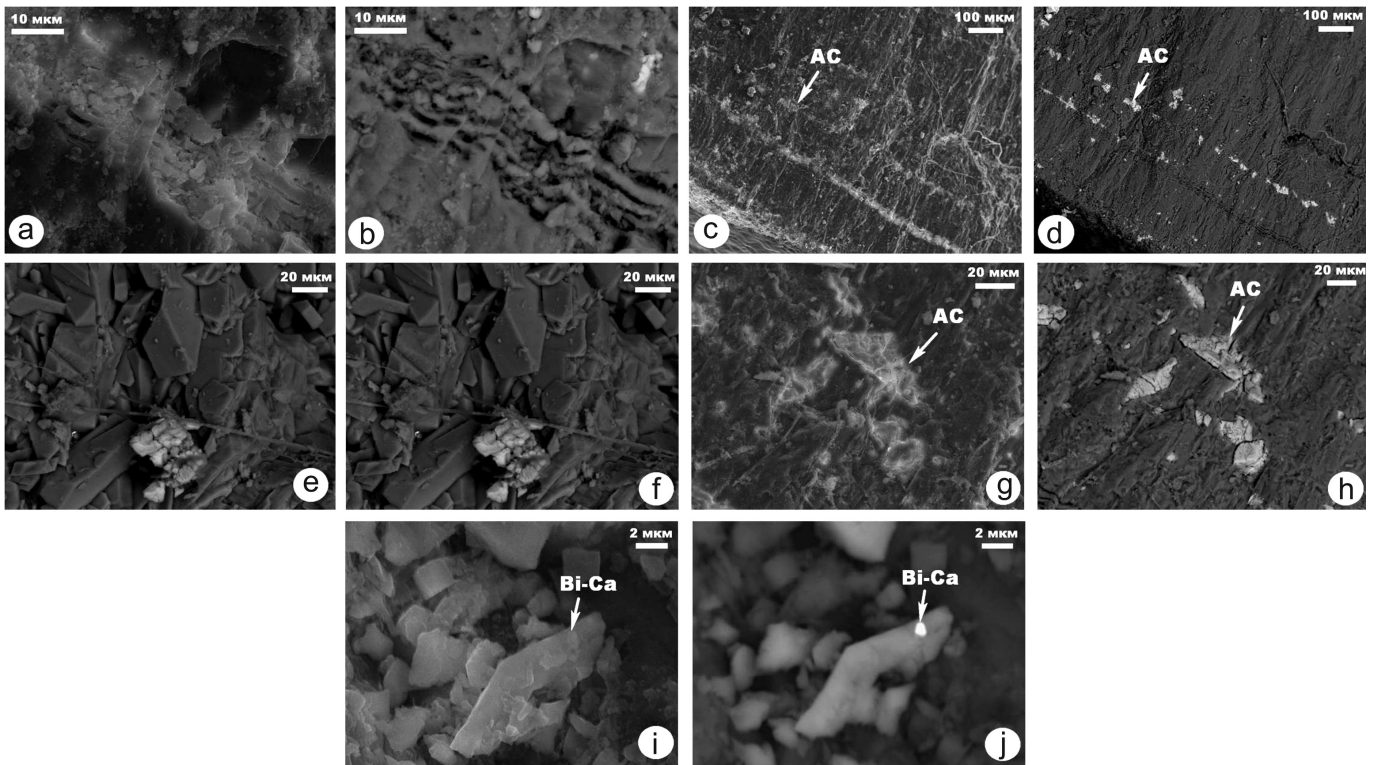


Рис. 8. СЭМ-изображения внутреннего строения обр. № 7 мочевых камней в режимах вторичных (а, с, е, г, i) и упруго-отраженных (b, d, f, h, j) электронов. Фазы: AC – силикаты и алюмосиликаты; Bi-Ca – металлоорганические соединения

Fig. 8. SEM images of the internal structure of urinary stones of sample No. 7 in the secondary (a, c, e, g, i) and elastically reflected (b, d, f, h, j) electron modes. Phases: AC – silicates and aluminosilicates; Bi-Ca – organometallic compounds

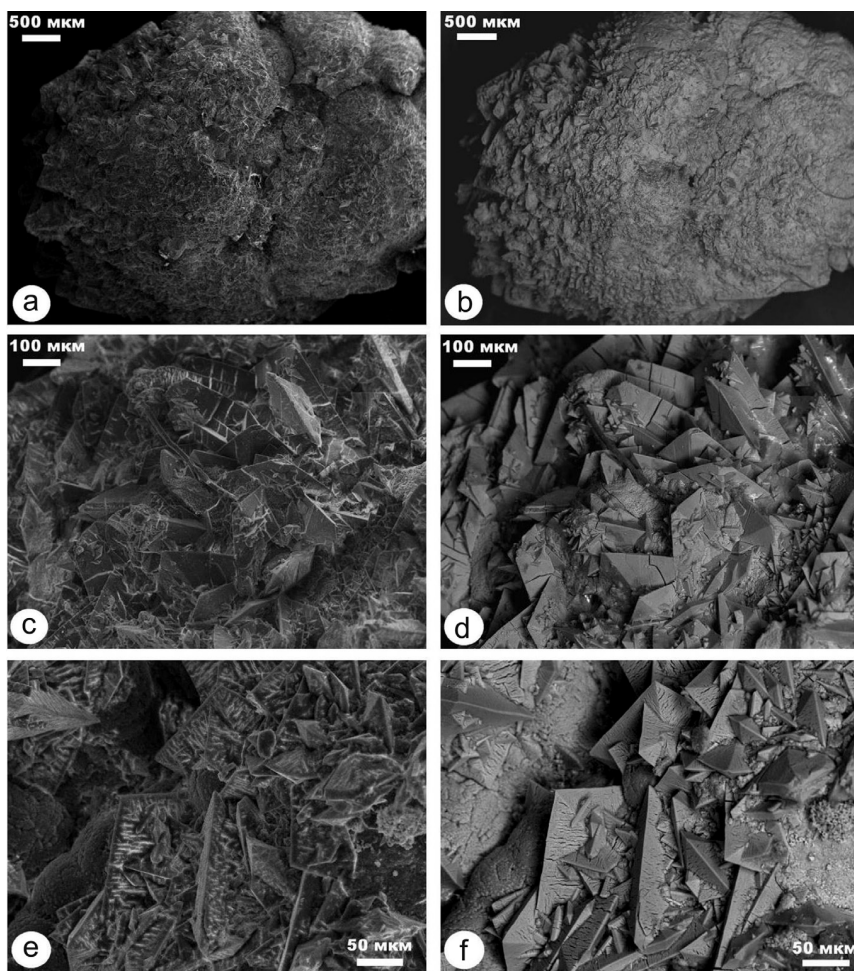


Рис. 9. СЭМ-изображения внутреннего строения обр. № 8 мочевых камней в режимах вторичных (а, с, е) и упругоотраженных (b, d, f) электронов

Fig. 9. SEM images of the internal structure of urinary stones of sample No. 8 in the secondary (a, c, e) and elastically reflected (b, d, f) electron modes

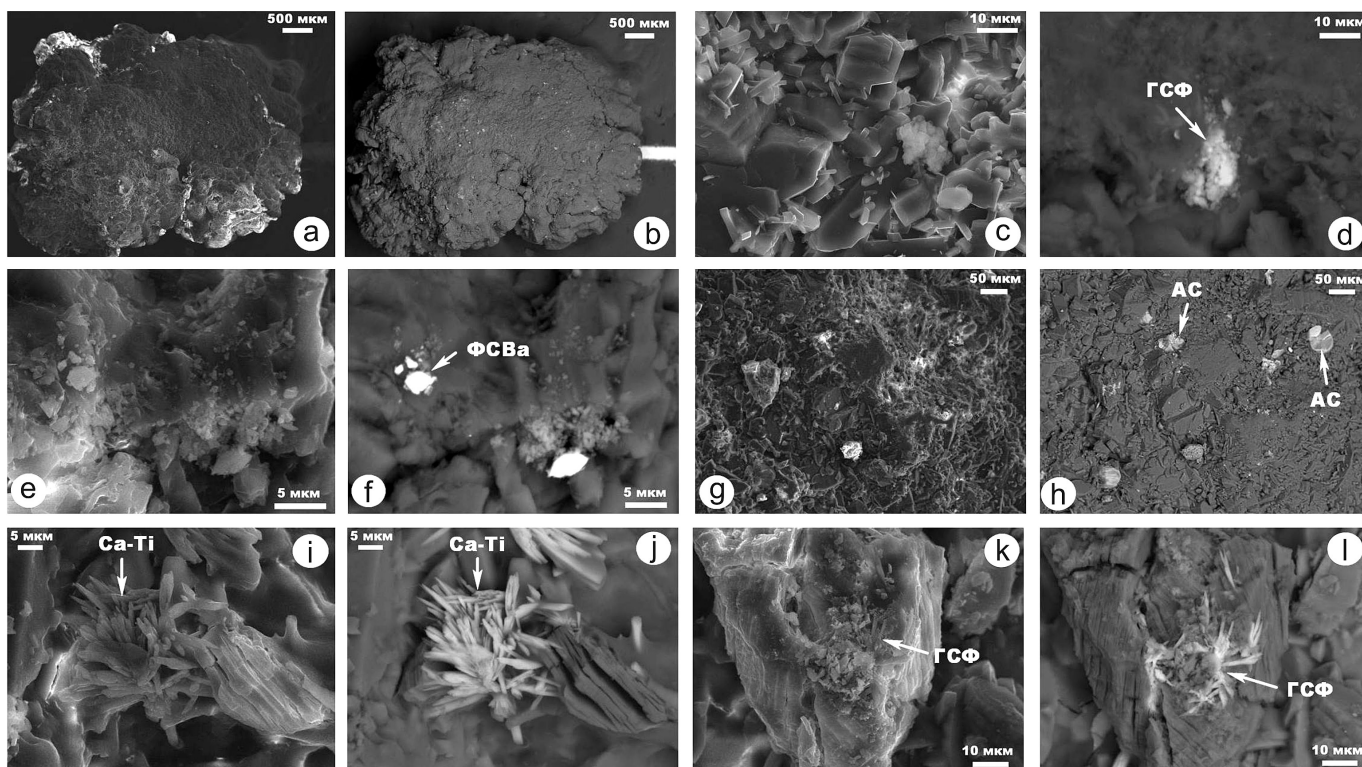


Рис. 10. СЭМ-изображения внутреннего строения обр. № 9 мочевых камней в режимах вторичных (а, с, е, г, i, k) и упругоотраженных (b, d, f, h, j, l) электронов. Фазы: Ca-Ti — сульфато-силикатофосфаты; ФСВа — фосфатосульфаты бария; ГСФ — гидроген-сульфатофосфаты

Fig. 10. SEM images of the internal structure of urinary stones of sample No. 9 in the secondary (a, c, e, g, i, k) and elastically reflected (b, d, f, h, j, l) electron modes. Phases: Ca-Ti — sulfate-silicatephosphates; ФСВа — barium phosphate-sulfates; ГСФ — hydrogen sulfate-phosphates

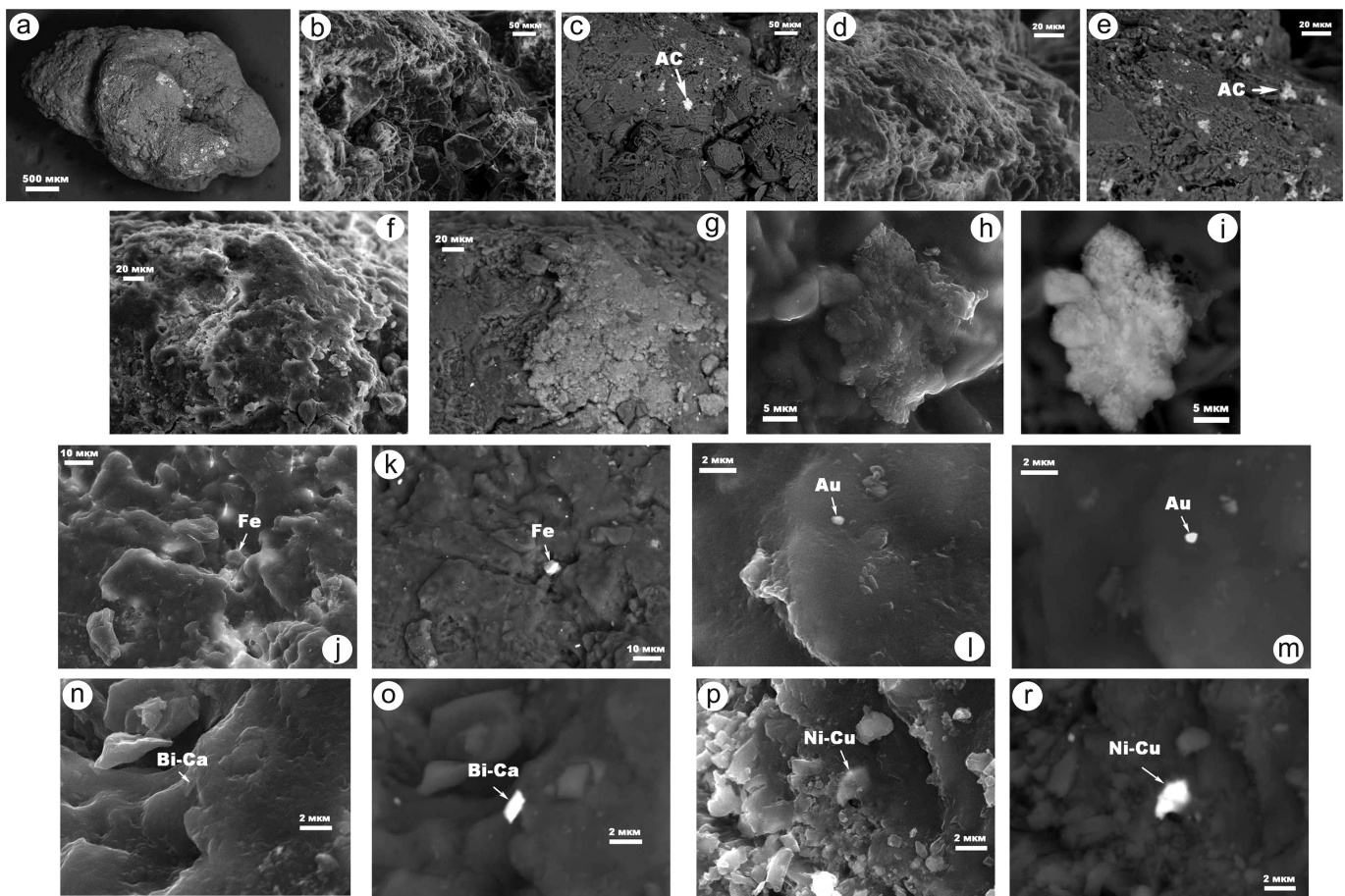


Рис. 11. СЭМ-изображения внутреннего строения обр. № 10 мочевых камней в режимах вторичных (a, b, d, f, h, j, l, n, p) и упругоотраженных (c, e, g, i, k, m, o, r) электронов. Фазы: AC — силикаты и алюмосиликаты; Fe, Au — выделения самородных металлов; Bi-Ca, Ni-Cu — металлоорганические соединения

Fig. 11. SEM images of the internal structure of urinary stones of sample No. 10 in the secondary (a, b, d, f, h, j, l, n, p) and elastically reflected (c, e, g, i, k, m, o, r) electron modes. Phases: AC — silicates and aluminosilicates; Fe, Au — precipitates of native metals; Bi-Ca, Ni-Cu — organometallic compounds

Ведделлит, $\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ = 8.76–8.77 (110); 6.19 (200); 4.42–4.43 (211); 4.36 (220); 3.91 (310); 3.68 (002); 3.39 (112); 3.16 (202); 3.09 (400); 2.81–2.82 (222); 2.78 (411); 2.67 (312); 2.42 (510); 2.41 (103); 2.37 (402); 2.34 (501); 2.28 (331); 2.24 (213); 2.21 (422); 2.12 (530); 2.02 (512); 1.994 (323); 1.957 (611); 1.898 (413); 1.836–1.837 (532); 1.797 (602); 1.787 (631); 1.762 (204); 1.741 (503); 1.711 (640); 1.695 (224); 1.624 (730); 1.624 (730); 1.578 (712); 1.564 (613); 1.552 (642).

Урицит (мочевая кислота), $\text{C}_5\text{H}_4\text{N}_4\text{O}_3$ = 6.59–6.63 (200); 5.66–5.68 (001); 4.94–4.96 (210); 4.78–4.80 (111); 4.50–4.51 (011); 3.87–3.89 (11–1); 3.72–3.74 (020); 3.6 (20–1); 3.28–3.29 (400); 3.20–3.21 (121); 3.11–3.12 (021); 3.01 (410); 2.88 (12–1); 2.80 (402); 2.63–2.64 (012); 2.58 (421); 2.46–2.47 (420); 2.42–2.43 (40–1); 2.41 (11–2); 2.32 (230); 2.28–2.29 (521); 2.25 (022); 2.19–2.24 (600); 2.15 (13–1); 2.10 (12–2); 2.03 (42–12); 1.918–1.919 (332); 1.879–1.881 (003); 1.801–1.809 (721); 1.796 (731); 1.77 (322); 1.746 (123); 1.667–1.668 (623); 1.641–1.642 (800); 1.616–1.617 (62–1); 1.594–1.598 (242); 1.553–1.554 (042).

Тиннункулит (урицит дигидрат), $\text{C}_5\text{H}_4\text{N}_4\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ = 8.84 (200); 5.99 (101); 5.67 (210); 4.23 (211); 3.78 (410); 3.72 (311); 3.42 (220); 3.25 (411); 3.20 (021); 3.15 (121); 3.06 (221); 2.8 (302); 2.72 (610); 2.61 (312); 2.58 (402); 2.50 (611); 2.43 (412); 2.37 (716); 2.19 (800); 2.15 (430).

Брушит, $\text{CaH}[\text{PO}_4] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ = 7.6 (020); 4.93 (–111); 4.24 (021); 3.80 (040); 3.64 (–131); 3.05 (041); 3.93 (–221); 2.86 (–112); 2.67 (150); 2.62 (220); 2.60 (–202); 2.52 (–132); 2.42 (–241); 2.41 (022); 2.27 (061); 2.25 (240); 2.17 (151); 2.15 (–242); 2.12 (042); 2.10 (–152); 2.08 (–311); 2.02 (170); 2.0 (171); 1.976 (112); 1.898 (08); 1.876 (260); 1.858 (–223); 1.815 (241); 1.797 (062); 1.787 (081); 1.741 (330).

Именно эти кристаллические фазы считаются в почечных камнях наиболее ранними и наиболее влияющими на регулирование режима пересыщения минералообразующих растворов в организме человека (Изатулина, Гуржий, 2014). Не исключено, что число окристаллизованных фаз не ограничивается оксалатами, урицитами и гидроген-фосфатами, но рентгеновский результат сильно лимитируется содержанием фаз и размером их индивидов.

ИК-поглощение в среднем ИК-диапазоне в основном определяется органическим веществом, на что указывают следующие группы полос в направлении снижения длины волны: 1) 428–540 cm^{-1} — деформационные колебания химических связей C–H (ароматические функциональные группы); 2) 710–770 cm^{-1} — внеплоскостные колебания химических связей C–C (ароматические функциональные группы); 3) 990–1135 cm^{-1} — деформационные колебания химических связей C–H, $-\text{CH}_2=\text{CH}_2=\text{CH}_2-$ и $-\text{CH}_2-\text{CH}_3-$

Таблица 2. Химико-фазовый состав мочевых камней по данным рентгеноспектрального микрозондового анализа

Table 2. Chemical-phase composition of urinary stones according to X-ray spectral microprobe analysis

№	Фазы / Phases	Объекты исследований / Objects of study									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Дисперсное органическое вещество, включая урициты Dispersed organic matter, including uric acid	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
2	Органическое вещество в форме эритроцитов Organic matter in the form of red blood cells	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	+	+	+
3	Водные оксалаты кальция (вевеллит и ведделлит) Hydrogenated calcium oxalates (whewellite and weddellite)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
4	Металлоорганические соединения Organometallic compounds	+	+	н. о.	+	+	+	+	н. о.	+	+
5	Самородные металлические фазы Native metallic phases	н. о.	+	»	+	+	+	н. о.	+	+	н. о.
6	Сульфиды / Sulfides	»	н. о.	»	н. о.	+	н. о.	»	н. о.	н. о.	»
7	SiO ₂ -фаза / SiO ₂ phase	»	+	»	»	н. о.	»	»	»	»	»
8	Магнетит / Magnetite	»	+	»	»	»	»	»	»	»	»
9	Силикаты и алюмосиликаты Silicates and aluminosilicates	+	+	+	+	+	+	+	»	+	+
10	Сульфато-силикатофосфаты кальция-титана Calcium-titanium sulfate-silicate-phosphates	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	»	+	н. о.
11	Гидроген-гидроксильные фосфатосульфаты бария Barium hydrogen-hydroxyl phosphate-sulfates	»	»	»	+	»	»	»	»	+	+
12	Гидрокси- и гидроген-хлориды Hydroxy- and hydrogen chlorides	+	»	+	н. о.	»	»	»	»	н. о.	н. о.
13	Гидроген-сульфаты и гидроген-фосфаты, включая брушит Hydrogen sulfates and hydrogen phosphates, including brushite	н. о.	+	н. о.	»	+	+	»	+	+	+
14	Биоапатит / Bioapatite	+	»	»	+	н. о.	+	»	+	н. о.	н. о.

Примечание. + – присутствуют, н. о. – не обнаружены.

Note. + – present, н. о. – not detected.

CH₃-CH₂- (фенольные гидроксилы, спирты, алифатические эфиры); 4) 1300–1387 см⁻¹ – деформационные колебания групп OH в химических связях CH₂(OH)-CO-CH₂(OH) (алифатические группы); 5) 1642–1674 см⁻¹ – деформационные колебания химических связей CO-OH (группы аминов, карбонильные группы) в органическом веществе и биоминералах – биоапатите и сульфатах; 6) 2800–2820 см⁻¹ – валентные колебания химических связей CH и CH₂

(алифатические функциональные группы); 7) 3006–3481 см⁻¹ – валентные колебания химических связей NH и групп OH (группы аминов и гидроксильные группы). Валовый элементный состав органического вещества в исследованных камнях приведен в табл. 3. Полученные для них данные примерно соответствуют данным и для желчных камней (Каткова, Боровкова, 2007), и для человеческого организма в целом (Колониченко, 2007).

Таблица 3. Элементный состав частиц органического вещества, мас. %

Table 3. Elemental composition of organic matter particles, wt. %

Компоненты Components	2/1	2/2	2/3	7/1	7/2	7/3	7/4	9/1	9/2	9/3	9/4	Статистика Statistic X ± S _x (V _x , %)
C	59.91	60.7	63.28	62.88	59.16	60.39	61.32	61.89	62.24	59.36	60.57	61.06 ± 1.38 (2.3)
N+H	23.74	25.79	23.42	24.02	26.29	24.5	28.86	24.67	24.35	27.99	26.83	25.5 ± 1.81 (7.1)
O	16.35	13.51	13.3	13.1	14.55	15.11	9.82	13.44	13.41	12.65	12.6	13.44 ± 1.64 (12.2)

Примечание. Статистические данные: X – среднее арифметическое, S_x – стандартное отклонение (СКО), V_x – коэффициент вариации. Атомный состав / Atomic composition: 2/1 – C_{0.66}(N+H)_{0.21}O_{0.13}; 2/2 – C_{0.66}(N+H)_{0.23}O_{0.11}; 2/3 – C_{0.69}(N+H)_{0.2}O_{0.11}; 7/1 – C_{0.68}(N+H)_{0.21}O_{0.11}; 7/2 – C_{0.65}(N+H)_{0.23}O_{0.12}; 7/3 – C_{0.66}(N+H)_{0.21}O_{0.13}; 7/4 – C_{0.67}(N+H)_{0.25}O_{0.08}; 9/1 – C_{0.67}(N+H)_{0.21}O_{0.12}; 9/2 – C_{0.68}(N+H)_{0.21}O_{0.11}; 9/3 – C_{0.65}(N+H)_{0.25}O_{0.1}; 9/4 – C_{0.66}(N+H)_{0.23}O_{0.11}.

Note. Statistical data: X – arithmetic mean, S_x – standard deviation (SD), V_x – coefficient of variation.



Таблица 4. Химический состав неорганической компоненты в обычных урицитсодержащих частицах органического вещества и эритроцитах (*), мас. %

Table 4. Chemical composition of the inorganic component in ordinary uric acid-containing particles of organic matter and erythrocytes (*), wt. %

№	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl	Сумма / Sum
1/1	1.61	н. о.	н. о.	н. о.	4.08	н. о.	0.25	н. о.	3.24	2.67	11.85
1/2	0.3	»	»	»	4.54	»	»	0.36	2.57	2.32	10.09
1/3	0.35	»	»	»	4.03	»	0.25	0.6	3.03	1.33	9.59
1/4	н. о.	»	»	»	3.18	0.91	0.32	0.34	2.88	1.34	8.97
1/5	0.46	»	»	»	0.59	н. о.	0.35	0.25	2.54	2.84	7.03
2/1	0.41	»	»	»	0.32	»	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	0.73
2/2	1.11	0.54	»	»	0.16	»	»	»	»	»	1.81
2/3	0.3	н. о.	»	»	0.19	»	0.25	»	0.44	»	1.18
2/4	0.23	»	»	»	н. о.	»	0.23	»	н. о.	»	0.46
3/1	0.25	»	»	»	*	»	н. о.	2.18	1.45	0.01	3.89
3/2	0.43	»	»	»	0.68	»	1.35	2.96	1.87	0.01	7.3
5/1	0.24	»	»	»	н. о.	»	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	0.24
5/2	4.16	»	»	0.85	5.41	2.16	0.75	2.72	9.36	0.1	25.51
5/3	1.19	»	»	н. о.	0.36	н. о.	0.22	0.29	0.39	0.92	3.37
5/4	н. о.	»	»	»	7.22	»	0.92	4.89	5.62	0.08	18.73
5/5	«	»	»	»	н. о.	»	н. о.	н. о.	н. о.	3.69	3.69
6/1	0.6	»	»	»	3.16	»	»	2.03	0.4	н. о.	6.19
7/1	0.29	»	»	»	н. о.	»	»	н. о.	н. о.	»	0.29
7/2	н. о.	»	»	»	0.14	»	0.14	»	»	»	0.28
X	0.63	0.03	0	0.04	1.79	0.16	0.26	0.87	1.78	0.81	6.38
S _x	0.96	0.12	0	0.19	2.3	0.53	0.37	1.4	2.43	1.21	6.79
9/1*	0.4	н. о.	2.86	н. о.	0.31	н. о.	0.89	н. о.	0.4	0.29	5.15
9/2*	0.93	»	н. о.	»	0.54	»	1.63	*	0.39	0.47	3.96
10/1*	0.86	»	»	»	0.3	0.79	1.0	0.78	1.43	1.01	6.17
10/2*	0.31	»	»	»	н. о.	н. о.	н. о.	0.37	н. о.	н. о.	0.68
10/3*	0.28	»	»	»	»	1.11	»	0.95	4.04	1.41	7.79
X	0.56	0	0.57	0	0.23	0.38	0.7	0.42	1.25	0.64	4.75
S _x	0.31	0	1.28	0	0.23	0.53	0.7	0.44	1.65	0.57	2.67

На кривых нагревания присутствуют экзотермические эффекты, отвечающие выгоранию органического вещества: пик В1 = (282—349 °С) отражает «липидный» этап ДТА (выгорание углеводов); В2 = (365—476 °С) — «аминокислотный» этап ДТА (выгорание белков) (Силаев, Юшкин, 2019). Кроме того, на кривых нагревания наблюдаются и три эндотермических эффекта: 1) экстремум при 55—100 °С (потеря гигроскопической воды); 2) перелом при 660—665 °С (возможно, конституционная вода в алюмосиликатах); 3) экстремум при 800—831 °С (вероятно, диссоциация кислородных солей (Архипенко, Бокий, 1982)).

По характеру распределения выявленных фаз исследуемые мочевые камни подразделяются на два типа. К первому — преобладающему — типу (№ обр. 1, 2, 4—6, 9, 10) относятся многофазные (от 6 до 14 фаз) камни, равномерно распределенные между мужчинами и женщинами с возрасте 27—83 лет. Второму — более редкому — типу (№ обр. 3, 7, 8) соответствуют ограниченно-фазные (3—5 фаз), преимущественно мужские. В целом полученные нами данные значительно расширяют известные представления о фазовом составе данного вида минерализаций (Боровкова, Филиппов, 2009; Изатулина, Гуржий, 2014; Ламанова, 2007; Лебедев, Смирнова, 2021; Мак-Коннелл, 1977; Машина, 2017; Нигматулина, Сокол, 2004; Ракин, Каткова, 2006; Севостьянова, Полиенко, 2004; Huskic, Resov, 2016).

Органическое вещество составляет до трети вещества мочевых камней, будучи равномерно рассеянным по объему камня в виде микровключений, линзочек и прослоев. По элементному составу — C_{0.65–0.68}(N+H)_{0.2–0.25}O_{0.08–0.13} (табл. 3) — оно примерно со-

ответствует смеси урицитов и бактериального вещества. Довольно часто наряду с обычными частицами органического вещества встречаются формы, похожие на эритроциты (клетки крови). Как правило, во всех этих органических образованиях присутствует поликомпонентная неорганическая примесь (табл. 4), вполне отражающая сложный минерально-фазовый состав камней. Эритроциты при этом такими примесями беднее раза в 1.5.

В части биоминералов в исследованных камнях преобладают *водные оксалаты кальция*, часто представленные хорошо окристаллизованными пластинчатыми формами (моноклинно-призматическими). При этом оксалаты характеризуются сильно примесным составом, комплексно отражающим всю сложность фазового состава камней (табл. 5).

Широкое распространение и разнообразие по составу в мочевых камнях имеет *металлоорганические соединения*, которые современными физиками рассматриваются как вполне закономерные формы конденсации металлов в живых организмах (Миронова, 2006). В нашем случае в камнях выявлены до восьми видов и разновидностей таких форм (табл. 6), которые в последовательности снижения частоты встречаемости металлических компонент могут быть представлены следующим образом: 1) оловянно-медные — Cu_{0.38–0.58}Sn_{0.05–0.44}Zn_{0–0.36}Pb_{0–0.04}Ni_{0–0.05}Fe_{0–0.06}Si_{0–0.09}Al_{0–0.07}Ca_{0–0.02}P_{0–0.22}S_{0–0.07}Cl_{0–0.12}; 2) золотые — Au_{0.51–0.77}Cu_{0–0.07}Pb_{0–0.01}Ni_{0–0.06}Si_{0–0.18}Al_{0–0.31}Ca_{0–0.06}K_{0–0.03}Cl_{0–0.06}; 3) железные — Fe_{0.88–1}P_{0–0.02}S_{0–0.03}Cl_{0–0.07}; 4) железистые — Fe_{0.42–0.47}Cu_{0–0.06}Zn_{0.06}Ni_{0–0.03}Pb_{0–0.01}Au_{0.01}Si_{0.19–0.25}Al_{0.02–0.21}Ca_{0.03–0.04}

Таблица 5. Химический состав неорганической компоненты в водных оксалатах кальция, мас. %

Table 5. Chemical composition of the inorganic component in aqueous calcium oxalates, wt.%

№	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CuO	ZnO	CaO	BaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl	Сумма / Sum
1/1	0.6	н. о.	н. о.	н. о.	31.17	н. о.	н. о.	0.97	0.67	0.17	33.58
1/2	0.71	»	»	»	32.55	»	0.2	0.83	0.69	0.15	35.13
2/1	0.6	»	»	»	31.17	»	н. о.	0.97	0.67	0.17	33.58
2/2	0.71	»	»	»	32.55	»	0.2	0.83	0.69	0.15	35.13
2/3	6.2	5.53	»	»	24.86	»	0.32	1.45	1.24	1.08	40.68
2/4	18.71	16.0	»	»	21.77	»	0.13	0.73	1.22	0.52	59.08
3/1	н. о.	н. о.	»	»	34.41	»	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	34.41
3/2	»	»	»	»	27.26	»	»	»	»	»	27.26
3/3	»	»	»	»	35.52	»	»	»	0.67	»	36.19
3.4	»	»	1.31	0.77	30.85	»	»	»	н. о.	»	32.93
3/5	1.19	0.97	н. о.	н. о.	26.44	»	»	»	»	»	28.6
4/1	н. о.	н. о.	»	»	31.31	»	»	0.59	0.51	»	31.9
4/2	0.56	»	»	»	33.87	»	»	н. о.	5.55	»	34.43
4/3	н. о.	»	»	»	30.91	»	»	1.15	0.32	»	32.57
4/4	0.84	»	»	»	32.06	9.87	»	н. о.	0	»	48.32
4/5	н. о.	»	»	»	31.57	н. о.	»	»	0.32	»	31.89
4/6	0.47	»	»	»	33.67	»	»	0.64	н. о.	»	34.78
4/7	1.49	1.03	»	»	29.45	»	»	н. о.	0.6	»	32.57
6/1	н. о.	н. о.	»	»	32.14	»	»	0.79	0.63	0.19	33.75
6/2	»	»	»	»	32.78	»	»	0.39	н. о.	н. о.	33.17
7/1	0.7	»	»	»	38.18	»	»	н. о.	»	»	33.88
7/2	0.42	»	»	»	33.49	»	»	0.4	»	»	34.31
7/3	0.46	»	»	»	36.79	»	»	н. о.	»	»	37.25
7/4	0.63	»	»	»	37.76	»	»	»	»	»	38.39
8/1	н. о.	»	»	»	35.57	»	»	0.38	»	»	35.95
8/2	»	»	»	»	35.11	»	»	0.77	»	»	35.88
8/3	»	»	»	»	34.42	»	»	н. о.	»	»	34.42
9/1	»	»	»	»	32.3	»	»	0.84	0.94	0.3	34.38
9/2	»	»	»	»	34.26	»	»	0.61	н. о.	н. о.	34.87
9/3	»	»	»	»	35.35	»	»	1.19	0.95	0.41	37.9
9/4	»	»	»	»	32.54	»	»	0.92	0.43	н. о.	33.89
9/5	0.32	»	»	»	33.09	»	»	0.91	н. о.	»	34.32
9/6	н. о.	»	»	»	33.59	»	»	0.39	0.46	»	34.44
9/7	»	»	»	»	34.1	»	»	0.84	0.45	»	35.39
9/8	»	»	»	»	30.98	»	»	0.8	0.65	0.34	32.77
9/9	1.46	»	»	»	35.29	»	»	0.78	0.75	0.29	38.57
9/10	н. о.	»	»	»	29.13	»	»	0.49	0.6	0.34	30.56
9/11	»	»	»	»	32.67	»	»	0.89	0.65	0.25	34.46
9/12	0.68	»	»	»	29.45	»	0.16	0.68	0.83	0.54	32.34
9/13	н. о.	»	»	»	33.8	»	н. о.	0.98	0.55	н. о.	35.33
9/14	»	»	»	»	31.97	»	»	0.74	н. о.	0.13	32.84
9/15	»	»	»	»	32.13	»	»	0.85	0.41	0.13	33.52
X	0.88	0.57	0.03	0.02	31.86	0.24	0.02	0.54	0.51	0.12	35.13
S _x	2.99	2.62	0.2	1.12	4.61	1.32	0.07	0.42	0.88	0.22	4.99

K_{0.01–0.02}S_{0–0.01}Cl_{10.02–0.03}; 5) цинковые — Zn_{0.44–0.95}Si_{0.01–0.08}Al_{0–0.04}Mg_{0–0.42}Ca_{0.01–0.03}K_{0–0.02}P_{0–0.12}S_{0–0.1}; 6) цинково-медные — Cu_{0.55–0.74}Zn_{0.24–0.44}Fe_{0.01–0.02}; 7) медистые — Cu_{0.44}Pb_{0.04}Fe_{0.01}Sn_{0.02}Si_{0.04}Al_{0.04}Ca_{0.02}K_{0.01}P_{0.25}S_{0.01}Cl_{0.19}; 8) никель-оловянные — Sn_{0.53}Ni_{0.13}Zn_{0.1}Cu_{0.04}Cl_{0.2}.

Наряду с металлоорганическими соединениями в исследованных камнях обнаружены собственно *металлические* фазы, подразделяющиеся на четыре разновидности (в порядке снижения частоты встречаемости): оловянистые — Sn_{0.6–0.94}Cu_{0.01–0.3}Fe_{0–0.23}Zn_{0–0.11}Ni_{0–0.03}Cr_{0–0.02}; железные — Fe; висмутовые — Bi_{0.94–1}Ca_{0–0.04}Si_{0–0.02}; железистые — Fe_{0.95–0.98}Mn_{0–0.04}Zn_{0–0.02}Cr_{0–0.01}(Si,Na,K)_{0–0.01} (табл. 7). В микроассоциации с металлическими фазами в мочевых камнях обнаружены редкие включения *сульфидов*, представленные пиритом (Fe = 46.13; S = 53.89 мас. %; эмпирическая формула — Fe_{0.98}S₂) и галенитом (Pb = 86.59; S = 13.41 мас. %; PbS).

Довольно распространенным биоминералом в изученных камнях выступает *магнетит*, широко варьирующий по составу (табл. 8). Его можно представить следующей эмпирической формулой: (Fe_{0.59–1}Cu_{0–0.22}Mg_{0–0.16}Mn_{0–0.13}Ni_{0–0.03}Zn_{0–0.02})(Fe_{0.55–2}Al_{0–0.6}Cr_{0–0.81}Ti_{0–0.04})₂O₄. По минимальному составу этот минерал подразделяется на четыре разновидности — преобладающую магнетитовую, герцинит-магнохромит-купрошпинель-магнетитовую, яacobсит-магнетитовую и франклинит-магнетитовую.

Широко распространены в исследованных мочевых камнях *силикатные* и *алюмосиликатные* микрофазы (табл. 9), чаще всего приуроченные к выделениям органического вещества. По составу и минералогической номенклатуре они могут быть сопоставлены (в последовательности снижения частоты встречаемости) с каолинитом, плагиоклазами, слюдами, анортотом, клинопироксенами, гранатами. Кроме того, в ассоциации с алюмосиликатами встречаются зерна



Таблица 6. Химический состав (мас. %) металлоорганических соединений

Table 6. Chemical composition (wt.%) of organometallic compounds

№	Au	Fe	Ni	Cu	Zn	Pb	Sn	Si	Al	Mg	Ca	Na	K	P	S	Cl	Сумма / Sum
1/1	2.41	22.7	2.07	н. о.	3.29	0.9	н. о.	5.95	6.41	н. о.	1.23	н. о.	0.54	н. о.	н. о.	0.93	46.43
1/2	1.39	26.18	2.01	»	4.2	н. о.	»	5.86	6.48	»	1.79	»	0.43	»	0.37	1.04	49.75
1/3	71.7	н. о.	н. о.	»	н. о.	1.98	»	3.41	3.51	»	0.89	»	0.46	»	н. о.	0.47	88.42
1/4	51.72	»	»	»	»	н. о.	»	4.23	4.39	»	1.27	»	0.68	»	»	0.98	63.27
2/1	н. о.	»	»	2.5	»	»	3.3	н. о.	н. о.	»	н. о.	»	н. о.	»	»	0.31	6.11
2/2	»	»	0.58	1.7	4.61	»	5.02	»	»	»	»	»	»	»	»	0.5	12.41
2/3	»	»	н. о.	3.66	0.82	»	7.86	»	»	»	»	»	»	»	»	0.26	12.6
2/4	»	»	0.55	4.37	4.26	»	2.91	»	»	»	»	»	»	»	»	0.5	12.59
2/5	»	0.93	н. о.	16.45	н. о.	4.48	4.1	1.46	1.02	»	0.52	»	0.11	4.01	0.46	0.74	34.28
2/6	»	0.57	»	20.0	»	5.39	2.18	0.88	87	»	0.6	»	0.18	4.43	0.34	0.96	36.4
2/7	»	1.56	»	18.92	»	1.46	7.69	1.16	0.52	»	н. о.	»	н. о.	1.78	н. о.	н. о.	33.09
2/8	»	1.9	»	19.3	»	2.44	11.31	1.17	0.8	»	»	»	»	2.14	»	0.22	39.28
2/9	»	0.8	»	9.35	»	0.58	3.83	0.5	0.5	»	»	»	»	0.66	0.44	н. о.	16.66
4/1	»	0.39	»	15.58	5.28	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	»	»	»	»	н. о.	н. о.	»	21.25
4/2	»	0.52	»	22.93	18.38	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	41.83
5/1	»	н. о.	»	н. о.	33.28	»	»	0.34	»	1.18	0.93	»	0.46	»	3.36	»	39.55
5/2	»	»	»	»	58.32	»	»	0.27	»	н. о.	0.36	»	0.17	0.81	н. о.	»	59.93
5/3	»	0.2	»	»	36.48	»	»	2.12	1.02	1.32	1.1	»	0.65	3.35	0.56	»	46.8
5/4	»	н. о.	»	»	55.43	»	»	0.24	н. о.	н. о.	0.36	»	н. о.	0.89	н. о.	»	56.92
10/1	»	11.78	»	»	н. о.	»	»	н. о.	»	»	н. о.	»	»	0.18	0.24	0.53	12.73
10/2	»	50.34	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	н. о.	н. о.	н. о.	50.34
10/3	14.89	н. о.	0.33	0.41	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	15.63

Таблица 7. Химический состав (мас. %) металлических фаз

Table 7. Chemical composition (wt.%) of metallic phases

№	Sn	Cr	Zn	Cu	Fe	Ni	Mn	Si	K	Bi	Ca	Cl
2/1	н. о.	0.43	н. о.	н. о.	95.25	н. о.	4.32	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.
2/2	»	н. о.	1.68	»	98.32	»	н. о.	»	»	»	»	»
2/3	»	»	0.72	»	98.46	»	0.82	»	»	»	»	»
2/4	»	»	н. о.	»	100	»	н. о.	»	»	»	»	»
2/5	»	»	»	»	100	»	»	»	»	»	»	»
2/6	»	»	»	»	100	»	»	»	»	»	»	»
2/7	»	»	»	»	96.08	»	3.92	»	»	»	»	»
2/8	96.7	»	»	3.3	н. о.	»	н. о.	»	»	»	»	»
2/9	90.0	»	4.17	4.37	»	1.46	»	»	»	»	»	»
2/10	93.1	1.12	5.03	0.75	»	н. о.	»	»	»	»	»	»
2/11	85.22	н. о.	6.86	7.04	»	0.88	»	»	»	»	»	»
6/1	76.67	»	н. о.	19.4	3.93	н. о.	»	»	»	»	»	»
6/2	75.45	»	»	11.15	13.4	»	»	»	»	»	»	»
6/3	н. о.	»	»	н. о.	н. о.	»	»	»	»	100	»	»
6/4	»	»	»	»	»	»	»	0.31	»	98.98	0.71	»
6/5	»	»	»	»	»	»	»	н. о.	»	99.7	0.3	»
9/1	»	»	»	»	97.09	0.03	0.5	0.37	0.18	н. о.	1.62	0.21

Примечание. Виды и разновидности металлических фаз (в скобках V_x — частота встречаемости, %): 2/4—2/6 — железные (25), 2/1—2/3, 2/7, 9/1 — железистые (16.7), 2/8—2/11 — оловянистые (58.3), 6/3—6/5 — висмутовые (25).

Note. Types and varieties of metallic phases (V_x in brackets is the frequency of occurrence, %): 2/4—2/6 — iron (25), 2/1—2/3, 2/7, 9/1 — ferrous (16.7), 2/8—2/11 — tin (58.3), 6/3—6/5 — bismuth (25).

кремниевой фазы состава (мас. %): $SiO_2 = 97.63$, $Al_2O_3 = 2.37$ — с эмпирической формулой $(Si_{0.97}Al_{0.03})O_2$.

Кислородные соли в составе мочевых камней представлены прежде всего биоаптитом (табл. 10), состав которого характеризуется следующей эмпирической брутто-формулой: $(Ca_{9.31-9.51}Mg_{0.09-0.29}Na_{0.2-0.5}K_{0-0.05}Ni_{0-0.04}Zn_{0-0.07})_{10}[P_{5.38-6}S_{0-0.21}C_{0-0.41}O_{24}F_{0-1.59}Cl_{0-0.04}(OH)_{0-1.85}]$. Судя по приведенной формуле, в камнях мы имеем дело главным образом с фтор-, фторгидроксил- и хлоргидроксилапатитом. Изредка встречается фторкарбонатапатит А-типа.

Наряду с биоаптитом в мочевых камнях обнаружена серия так называемых гибридных соединений, в составе которых сочетаются несколько комплексных анионов — силикатных, фосфатных, сульфатных. К таким соединениям отнесены титано-кальциевые суль-

фато-силикатофосфаты с эмпирической брутто-формулой: $(Ca_{0.47-0.62}Ti_{0.19-0.75})_{0.81-1.22}[PO_4]_{0.55-0.76}[SiO_4]_{0.21-0.42}[SO_4]_{0.02-0.03}$ (табл. 11) — и гидроген-гидроксильные фосфатосульфаты бария (табл. 12), которым отвечают следующие эмпирические формулы: $(Ba_{0.79-0.99}Ca_{0.03-0.25}Sr_{0-0.05}K_{0-0.05})_{0.87-1.24}H_{0-0.41}[SO_4]_{0.9-1}[PO_4]_{0-0.1}(OH)_{0-0.48}$ и $(Ba_{0.67-0.68}Ca_{0.02-0.04}Ni_{0.06-0.08}Na_{0-0.37}K_{0-0.05}Cu_{0-0.08})_{0.79-1.27}H_{0-0.53}[SO_4]_{0.87-0.89}[PO_4]_{0.11-0.13}(OH)_{0-0.48}$.

В качестве галогенидов в мочевых камнях выступают гидрокси- и гидроген-хлориды с незначительной примесью сульфатного и фосфатного анионов (табл. 13). По катионному составу эти минералы можно подразделить на четыре разновидности: натрий-кальций-кальциевые гидроксиды — $(K_{0.9-0.99}Na_{0-0.09}Ca_{0.05-0.27})_{1.03-1.86}[SO_4]_{0.01-0.02}[PO_4]_{0-0.02}Cl_{0.97-0.99}(OH)_{0.07-0.81}$;



Таблица 8. Химический (мас. %), минеральный (мол. %) составы и эмпирические формулы магнетита
Table 8. Chemical (wt.%), min. (mol.%) compositions and empirical formulas of magnetite

Компоненты / Components	2/1	2/2	2/3	2/4	2/5	2/6	2/7	2/8
Fe ₂ O ₃	67.07	95.62	98.53	98.63	100	100	100	96.43
TiO ₂	0.57	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.
Al ₂ O ₃	6.89	»	»	»	»	»	»	»
Cr ₂ O ₃	13.84	0.43	»	»	»	»	»	»
CuO	7.73	н. о.	»	»	»	»	»	»
NiO	1.06	»	»	»	»	»	»	»
ZnO	н. о.	»	1.47	0.58	»	»	»	»
MnO	»	3.95	н. о.	0.79	»	»	»	3.57
MgO	2.84	н. о.	»	н. о.	»	»	»	н. о.
Минералы / Minerals								
Магнетит FeFe ₂ O ₄	37.5	86.5	87	95	100	100	100	88
Ульвит Fe ₂ TiO ₄	2	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.
Якобит MnFe ₂ O ₄	н. о.	13	н. о.	3	»	»	»	12
Франклинит ZnFe ₂ O ₄	»	н. о.	13	2	»	»	»	н. о.
Треворит NiFe ₂ O ₄	3	»	н. о.	н. о.	»	»	»	»
Хромит FeCr ₂ O ₄	4.5	0.5	»	»	»	»	»	»
Магнохромит MgCr ₂ O ₄	16	н. о.	»	»	»	»	»	»
Герцинит FeAl ₂ O ₄	15	»	»	»	»	»	»	»
Купрошпинель CuFe ₂ O ₄	22	»	»	»	»	»	»	»

Примечание/Note. Эмпирические формулы магнетита / Empirical formulas of magnetite: 2/1 – (Fe_{0.59}Cu_{0.22}Mg_{0.16}Ni_{0.03})(Fe_{0.55}Al_{0.6}Cr_{0.81}Ti_{0.04})₂O₄; 2/2 – (Fe_{0.87}Mn_{0.13})(Fe_{1.99}Cr_{0.01})₂O₄; 2/3 – (Fe_{0.87}Zn_{0.13})Fe₂O₄; 2/4 – (Fe_{0.95}Mn_{0.03}Zn_{0.02})Fe₂O₄; 2/5 – 2/7 – FeFe₂O₄; 2/8 – (Fe_{0.88}Mn_{0.12})Fe₂O₄.

Таблица 9. Химический состав микровключений силикатов и алюмосиликатов
 в органическом веществе, мас. %

Table 9. Chemical composition of microinclusions of silicates and aluminosilicates in organic matter, wt. %

№	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	NiO	ZnO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl	Сумма / Sum
1/1*	24.22	0.31	18.39	0.42	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	3.46	1.53	0.54	н. о.	0.75	1.14	50.76
1/2*	36.99	н. о.	28.38	0.51	»	»	»	»	3.57	3.28	1.17	»	0.46	0.97	75.33
1/3*	30.09	»	23.29	0.32	»	»	»	»	6.7	н. о.	н. о.	»	0.39	0.48	61.27
1/4*	39.66	0.24	31.79	0.43	»	»	»	»	0.34	»	»	»	н. о.	0.33	72.79
1/5*	23.54	0.49	18.96	н. о.	»	»	»	»	7.19	»	1.29	»	0.42	1.43	53.32
2/1*	38.53	0.56	29.54	»	»	»	»	»	0.18	»	н. о.	»	н. о.	н. о.	58.81
2/2*	33.76	н. о.	25.87	0.44	»	»	»	»	0.67	»	»	»	0.46	»	61.1
2/3*	47.77	»	37.75	0.32	»	»	»	»	0.3	»	»	»	н. о.	»	86.14
2/4*	39.72	0.25	30.29	0.35	»	»	»	»	н. о.	»	0.25	»	0.37	»	71.23
3/1*	44.98	0.57	36.63	0.58	»	»	»	»	0.59	0.49	н. о.	»	н. о.	»	38.86
3/2*	52.29	0.41	41.72	0.96	»	»	»	»	н. о.	0.42	»	»	»	»	95.8
6/1*	45.64	0.73	36.63	0.55	»	»	»	»	3.66	н. о.	0.3	4.56	0.69	»	92.76
6/2*	49.78	н. о.	39.9	0.44	»	»	»	»	3.49	»	0.2	3.46	н. о.	»	07/27
7/1*	53.94	0.68	40.99	0.34	»	»	»	»	н. о.	»	0.24	н. о.	0.47	»	66.66
7/2*	44.08	н. о.	35.72	0.53	»	»	»	»	»	»	н. о.	»	н. о.	»	80.93
9/1*	38.16	0.51	31.23	0.35	»	»	»	»	»	»	»	»	»	0.13	70.38
9/2*	42.8	0.32	34.67	0.61	»	»	»	»	»	»	»	»	»	н. о.	78.4
10/1*	44.17	0.9	35.2	0.34	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	80.61
10/2*	41.14	0.85	32.84	0.41	»	»	»	»	»	»	»	0.48	»	»	75.72
10/3*	48.66	0.52	38.54	0.41	0.48	»	»	»	»	»	»	н. о.	»	»	88.59
1/6**	44.92	0.38	1.69	13.75	н. о.	»	0.69	14.23	11.78	»	»	»	»	»	87.44
4/1***	20.21	0.35	17.1	н. о.	»	»	н. о.	н. о.	18.97	»	»	1.03	0.49	»	58.16
5/1***	62.12	н. о.	16.66	0.93	»	1.77	»	»	1.06	3.25	6.95	1.45	0.83	»	95.02
5/3***	48.92	»	12.93	0.73	»	»	»	»	0.8	5.93	0.49	0.48	0.42	»	30.7
9/3***	61.57	»	20.58	н. о.	»	»	»	»	3.36	9.12	0.19	н. о.	н. о.	»	80.61
5/4****	25.42	»	10.66	3.0	»	»	»	»	10.65	н. о.	н. о.	»	1.06	»	56.72
9/4****	38.95	»	16.39	3.78	»	»	»	1.08	0.39	»	7.89	»	0.53	»	75.72
5/5****	36.5	»	18.1	4.96	»	»	»	2.56	4.77	»	4.24	1.94	1.43	»	74.51
5/6****	52.25	»	20.54	5.71	»	»	»	4.6	0.6	»	4.06	1.65	1.84	»	94.7

Примечание. Минералоподобие включений: * каолинит, ** клинопироксены, *** плагиоклазы, анортотоклаз, **** гранат, ***** слюды.

Note. Mineral-like inclusions: * kaolinite, ** clinopyroxenes, *** plagioclases, anorthoclase, **** garnet, ***** micas.



Таблица 10. Химический состав (мас. %) и эмпирические формулы микровключений биоапатита
Table 10. Chemical composition (wt.%) and empirical formulas of bioapatite microinclusions

№	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	NiO	ZnO	P ₂ O ₅	SO ₃	F	Cl
1/1	52.99	0.38	1.46	0.19	0.24	н. о.	41.66	0.97	3.11	н. о.
1/2	54.38	0.35	1.37	н. о.	н. о.	»	39.15	1.73	3.02	»
4/1	53.68	0.76	1.6	»	»	»	42.82	1.14	н. о.	»
6	53.62	1.18	0.62	»	»	»	43.74	0.72	»	0.12
8/1	51.86	0.53	1.34	0.25	»	0.44	41.82	3.16	»	н. о.
8/2	53.28	0.82	1.47	н. о.	»	н. о.	43.41	н. о.	1.02	»

Примечание / Note. Эмпирические формулы / Empirical formulas: 1/1 — (Ca_{9.35}Mg_{0.1}Na_{0.47}K_{0.04}Ni_{0.04})₁₀[P_{5.91}S_{0.09}O₂₄]F_{1.58}; 1/2 — (Ca_{9.48}Mg_{0.09}Na_{0.43})₁₀[P_{5.38}S_{0.21}C_{0.41}O₂₄]F_{1.37}; 4/1 — (Ca_{9.31}Mg_{0.19}Na_{0.5})₁₀[P_{5.86}S_{0.14}O₂₄](OH)_{1.7}; 6 — (Ca_{9.51}Mg_{0.29}Na_{0.2})₁₀[P_{5.91}S_{0.09}O₂₄]Cl_{0.04}(OH)_{1.85}; 8/1 — (Ca_{9.32}Mg_{0.13}Na_{0.43}K_{0.05}Zn_{0.07})₁₀[P_{5.93}S_{0.07}O₂₄]F_{1.59}; 8/2 — (Ca_{9.33}Mg_{0.2}Na_{0.47})₁₀[P₆O₂₄]F_{0.53}(OH)

Таблица 11. Химический состав (мас. %) микровключений титано-кальциевых сульфато-силикатофосфатов бария

Table 11. Chemical composition (wt.%) of microinclusions of titanium-calcium sulfate-silicate-phosphates of barium

№	SiO ₂	TiO ₂	CaO	P ₂ O ₅	SO ₃	Сумма / Sum
9/1	12.69	16.05	22.27	32.77	1.34	85.12
9/2	14.43	20.86	19.14	29.31	1.22	84.96
9/3	8.33	10.03	23.18	35.81	1.67	79.02
9/4	10.73	15.38	22.99	35.93	1.23	86.26
9/5	13.41	31.59	14.02	20.78	1.99	80.79

Таблица 12. Химический состав (мас. %) микровключений гидроген-гидроксильных фосфатосульфатов бария
Table 12. Chemical composition (wt.%) of microinclusions of hydrogen-hydroxyl barium phosphate sulfates

№	BaO	CaO	SrO	NiO	CuO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃
9/1	62.0	0.68	2.09	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	35.23
9/2	61.83	5.63	н. о.	»	»	»	»	»	32.54
10/1	59.35	0.75	»	»	»	»	1.16	3.41	35.33
10/2	49.76	0.94	»	2.24	2.49	5.57	1.06	4.28	33.66
10/3	53.34	0.67	»	2.85	1.75	н. о.	0.82	3.94	36.63
10/4	54.11	1.15	»	3.03	н. о.	»	н. о.	4.23	37.48

Таблица 13. Химический состав (мас. %) и эмпирические формулы микровключений гидроксид- и гидрогенхлоридов

Table 13. Chemical composition (wt.%) and empirical formulas of microinclusions of hydroxy- and hydrogen chlorides

№	Ca	Na	K	Fe	Ti	Cl	S	P	Сумма
1/1	1.54	1.49	29.06	н. о.	н. о.	25.75	0.22	н. о.	58.06
1/2	14.14	0.93	17.52	»	»	15.37	0.19	0.31	48.46
1/3	5.91	н. о.	19.49	»	»	18.38	0.26	0.18	44.223
1/4	2.05	11.63	0.96	»	»	37.6	н. о.	н. о.	52.24
1/5	7.11	5.14	0.57	»	»	25.56	0.21	»	38.59
1/6	5.79	н. о.	20.95	»	»	17.81	0.21	0.14	44.59
1/7	1.93	4.13	0.48	»	»	44.72	н. о.	н. о.	51.26
1/8	2.14	4.47	0.63	»	»	45.29	»	»	52.53
1/9	10.96	1.2	н. о.	»	»	16.95	0.31	0.3	29.72
1/10	6.78	5.35	0.48	»	»	25.43	н. о.	н. о.	38.04
3/1	0.35	7.69	10.72	0.24	0.27	18.8	»	»	38.07
3/2	0.86	3.83	5.29	0.24	0.28	3.8	»	»	14.3

калий-натриевые гидроксидхлориды — (Na_{0.62–1.53}K_{0.25–0.51}Ca_{0–0.02}Fe_{0.01–0.04}Ti_{0.01–0.05})_{1.17–3.07}Cl(OH)_{0.21–2.41}; натрий-кальциевые гидроксидхлориды — (Ca_{0.54}Na_{0.1})_{0.64}[SO₄]_{0.02}[PO₄]_{0.02}Cl_{0.96}(OH)_{0.12}; кальций-натриевые гидроген-хлориды — (Na_{0.14–0.47}K_{0.01–0.02}Ca_{0.04–0.28})_{0.19–0.57}H_{0.15–0.77}[SO₄]_{0–0.01}[PO₄]_{0–0.01}Cl_{0.98–1}.

Таким образом, в составе изученных нами мочевых камней обнаружены биоминералы, охватывающие практически всю современную номенклатуру минеральных типов: простые вещества (металлы), халькогениды (сульфиды), галогениды (хлориды), оксиды (магнетит, SiO₂-фаза), силикаты (алюмосилика-

ты), кислородные соли. В дополнение к минералам в камнях присутствуют так называемые минералоиды, представленные водными оксалатами кальция и урицитами.

Моча, сопряженная с мочевыми камнями и принадлежащая пациентам с пиелонефритом, исследовалась на валовый химический состав. Полученные данные для обеих коллекций мочи оказались схожими (мас. %, в скобках — среднее): H₂O = 75–77 (76.3), Cl = 6–12 (9), SO₃ = 1.5–4 (2.8), P₂O₅ = 2.5–7 (4.4), Na₂O = 3–5 (4), K₂O = 2–4 (2.7), CaO = 0.2–0.3 (0.26), MgO = 0.05–0.25 (0.14), NH₄ = 0.6–1.5 (1.5).

Микроэлементы

Определялись в образцах мочевых камней и моче пациентов с мочекаменной болезнью (*моча-1*) и пиелонефритом (*моча-2*).

В составе исследованных мочевых камней выявлены 18 микроэлементов, из которых к определяющим сумму относятся $Zn > Sr > Ti$ (табл. 14). Доля (%) групп органофильных элементов (Солонин, 1991) в среднем составляет для эссенциальных (жизненно необходимых) — 46.2, физиогенно-активных — 53.7. Доля элементов-антибионтов крайне незначительна — 0.1%. Из приведенных данных следует, что в составе мочевых камней абсолютно доминируют именно органофильные микроэлементы. При этом суммарное содержание этих элементов в камнях отрицательно коррелируется с массой камней ($r = -0.39$) и возрастом человека ($r = -0.73$). По сравнению с микроорганизмами в человеческих конкрементах (Павлович, Кокин, 2019) общее содержание микроэлементов в исследованных камнях выше в 30–1580 раз. Согласно вычисленным кларкам концентрации, степень обогащения камней эссенциальными и физиогенно-активными микроэлементами несколько уступает таковой в земной коре ($КК < 1$), но многократно (до $КК = 100$) превышает степень концентрации тех же элементов в базовых органических субстанциях (Войткевич, Кокин, 1990) в последовательности «наземные растения < бактерии < наземные животные < живое вещество». При этом в сравнении с большинством органических субстанций в мочевых камнях физиогенно-активные микроэлементы значительно преобладают над эссенциальными (рис. 12).

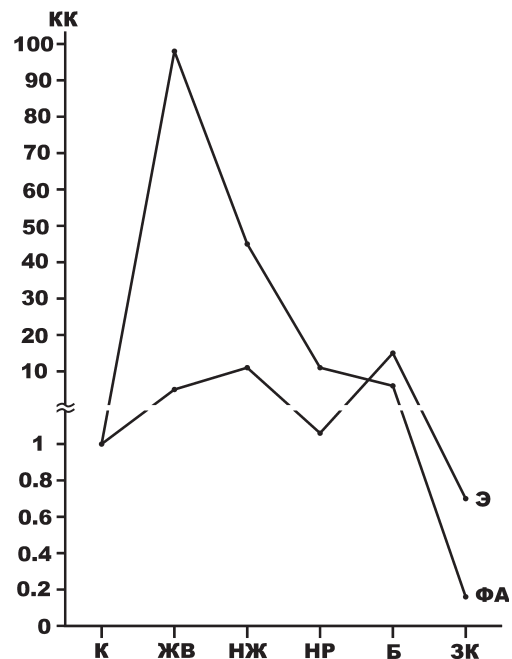


Рис. 12. Усредненные кларки концентрации микроэлементов в мочевых камнях (К). Объекты сопоставления (по: Войткевич, Кокин, 1990): ЖВ — живое вещество, НЖ — наземные животные, НР — наземные растения, Б — бактерии, ЗК — земная кора

Fig. 12. Averaged clark values of microelement concentrations in urinary stones (K). Objects of comparison (according to: Voitkevich, Kokin, 1990): ЖВ — living matter, НЖ — terrestrial animals, НР — terrestrial plants, Б — bacteria, ЗК — earth's crust

Таблица 14. Содержание микроэлементов в камнях, г/т

Table 14. Content of microelements in stones, g/t

Элементы / Elements	Объекты / Objects								
	1	2	3	4	5	6	8	9	$X \pm S_x (V_x, \%)$
Ag	0.05	0.05	0.05	0.09	0.05	0.05	0.05	0.05	$0.06 \pm 0.01 (17)$
Cd	0.05	0.05	0.05	0.05	1.4	0.05	0.05	0.05	$0.22 \pm 0.48 (218)$
Zn	13	0.7	45	32	2-3	1.9	194	0.05	$61.21 \pm 86.27 (141)$
Rb	0.05	0.21	0.05	0.05	0.05	0.37	0.05	0.05	$0.11 \pm 0.12 (109)$
Pb	0.68	0.11	0.81	1.5	3.8	0.05	3.3	0.73	$1.37 \pm 1.42 (104)$
Bi	0.05	0.05	0.05	0.05	2.1	0.05	0.05	0.05	$0.31 \pm 0.72 (232)$
Сумма элементов эссенциальных (Э) Sum of essential elements (E)	13.88	1.17	46.01	33.74	210.4	2.47	197.5	0.98	$63.27 \pm 88.4 (140)$
Cs	0.34	0.09	0.35	0.1	0.43	0.04	0.13	0.38	$0.23 \pm 0.13 (57)$
Sr	50	0.49	71	47	156	0.72	66	0.05	$48.91 \pm 31.02 (63)$
Ba	0.05	0.05	0.05	0.05	9.1	0.05	0.88	0.05	$1.29 \pm 1.28 (99)$
Ti	4.7	2.6	11	6.6	80	1.5	19	0.05	$15.68 \pm 11.51 (73)$
Zr	0.76	0.3	1.2	0.82	1.2	0.45	1.1	2.8	$1.08 \pm 0.91 (84)$
V	0.05	0.35	0.05	1.2	3.5	0.63	0.05	8.4	$1.78 \pm 3.34 (188)$
Cr	0.05	0.05	0.05	0.05	3.6	0.05	0.05	0.05	$0.49 \pm 0.53 (108)$
Co	2.2	0.05	2.3	2	2.3	0.05	2.3	0.05	$1.41 \pm 0.96 (68)$
Ni	3.6	0.05	2.6	3.8	4.2	0.05	4.7	0.05	$2.38 \pm 1.93 (81)$
Cu	0.45	3.1	0.05	0.37	0.05	3.1	0.05	0.05	$0.9 \pm 1.25 (139)$
Сумма элементов физиогенно-активных (ФА) Sum of physiogenically active elements (PA)	62.2	7.13	88.65	61.99	260.38	6.64	94.26	11.93	$74.15 \pm 41.52 (56)$
Ta	0.06	0.04	0.05	0.07	0.05	0.05	0.05	0.05	$0.05 \pm 0.01 (20)$
Gd	0.05	0.05	0.05	0.39	0.05	0.05	0.05	0.05	$0.09 \pm 0.12 (133)$
Сумма элементов-антибионтов (АБ) Sum of abiont elements (AB)	0.11	0.09	0.1	0.46	0.1	0.1	0.1	0.1	$0.15 \pm 0.13 (87)$
Итого / Total	76.19	8.39	134.46	96.19	470.88	9.21	291.86	13.01	$137.56 \pm 164.35 (119)$



В образцах мочи-1 пациентов с мочекаменной болезнью выявлен 41 микроэлемент (табл. 15), что более чем в 2 раза превышает число микроэлементов в соответствующих образцах мочевых камней. К определяющим сумму в моче малым элементам относятся: $Ti > Rb > Zn > Sr > V > As$. В отличие от камней, моча содержит 9 лантаноидов, при этом содержание элементов иттриевой подгруппы превышает содержание элементов цериевой подгруппы в 3 раза. Проанализированная моча по сравнению с образцами камней валово обога-

щена микроэлементами в среднем в 26 раз. По суммарной их концентрации она отрицательно коррелируется с камнями (-0.73) и возрастом больных ($r = -0.33$). Доли (%) групп элементов органофилов в моче составляют в среднем для эссенциалов — 86.4, физиогенно-активных — 12.9, элементов-антибионтов — 0.7. То есть в составе мочи, так же как и в камнях, сильно доминируют именно органофильные микроэлементы. Согласно кларкам концентрации, степень обогащения мочи эссенциальными и физиогенно-активными микроэле-

Таблица 15. Содержание микроэлементов в образцах мочи-1, сопряженной с мочевыми камнями, г/л
Table 15. Content of trace elements in urine-1 samples compared to urinary stones, g/l

Элементы Elements	Объекты / Objects										X ± S _x (V _x , %)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Li	110	40	50	23	9	23	31	9	26	40	36.1 ± 29.11 (81)
Rb	1500	380	700	1000	250	280	900	300	460	1100	687 ± 425.21 (62)
Be	0.05	0.05	0.23	0.05	0.8	0.05	0.05	0.05	0.4	0.22	0.2 ± 0.24 (120)
Mo	60	12	50	70	12	17	44	19	19	50	35.3 ± 21.79 (62)
Ag	0.52	0.05	0.05	0.05	0.91	0.4	0.109	0.16	0.05	0.05	0.23 ± 0.29 (126)
Zn	800	0.05	400	210	80	40	0.05	1400	300	1500	473.01 ± 569.08 (120)
Cd	0.26	0.12	0.05	0.05	1.5	1.2	0.25	0.5	0.3	0.05	0.43 ± 0.51 (119)
Pb	1.9	0.05	2.4	0.14	9	8	0.05	0.05	0.05	0.9	2.25 ± 3.41 (152)
As	308	90	107	91	109	92	158	127	93	150	132.5 ± 66.43 (50)
Se	66	89	54	44	38	66	87	11.2	77	67	59.92 ± 23.89 (40)
Th	0.14	0.05	0.13	0.05	0.05	0.05	0.3	0.05	0.05	0.3	0.12 ± 0.1 (83)
Сумма элементов Э Sum of E elements	2846.87	611.37	1363.86	1438.34	510.26	527.7	1220.81	1867.01	975.85	2908.52	1427 ± 879.97 (62)
Cs	4.2	1	3.1	1.9	1.7	8.3	2.2	0.8	1.6	3.9	2.87 ± 2.22 (77)
Sr	500	0.05	400	0.05	0.05	19	170	120	0.05	500	170.92 ± 213.83 (125)
Ba	0.05	0.05	2.2	0.05	0.7	0.05	0.13	0.05	0.05	4.8	0.81 ± 1.56 (193)
Y	0.22	0.05	0.05	0.05	0.09	0.04	0.05	0.2	0.1	0.07	0.09 ± 0.06 (67)
Ti	3900	900	2100	600	500	160	2300	1900	1500	3000	1686 ± 1192.09 (71)
Zr	1.2	1.3	0.4	1	1	1.2	0.5	0.4	0.04	0.7	0.77 ± 0.43 (56)
Hf	0.15	0.33	0.04	0.38	0.05	0.06	0.02	0.05	0.08	0.11	0.13 ± 0.13 (100)
V	220	150	160	110	140	130	240	50	140	200	154 ± 55.42 (36)
Cr	100	7	70	70	19	17	180	19	50	90	62.2 ± 52.88 (85)
Co	1.2	0.05	1.5	0.7	0.05	0.05	0.05	0.26	1.4	0.8	0.61 ± 0.59 (97)
Ni	24	7	28	4	8	14	12	10	16	20	14.3 ± 7.7 (54)
Cu	31	7	9	8	3.8	0.05	10	4	0.05	26	9.89 ± 10.45 (106)
Ga	19	1.7	7	3	1.6	0.05	11	8	5	11	6.73 ± 5.79 (86)
Sn	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.23	0.22	0.05	0.12	0.3	0.12 ± 0.1 (83)
Sb	2.5	4	2.2	1.7	2.8	1.7	2	2.4	3.1	4	2.64 ± 0.84 (32)
Te	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.05	0.05	0.05	0.22	0.07 ± 0.05 (71)
Сумма элементов ФА Sum of PA elements	4803.62	1079.63	2783.59	800.93	678.94	351.79	2928.22	2115.26	1717.64	3861.9	2112.15 ± 1472.58 (70)
Sc	19	2.7	11	10	4.3	0.7	11	15	5	14	9.29 ± 5.9 (64)
Nb	0.02	0.05	0.05	0.06	0.05	0.05	0.22	0.13	0.06	0.25	0.09 ± 0.08 (89)
W	0.15	0.004	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.12	0.06 ± 0.04 (67)
Tl	0.11	0.05	0.03	0.05	0.02	0.05	0.08	0.05	0.05	0.05	0.05 ± 0.03 (60)
Ge	4	0.05	0.05	2	1.4	1.3	1.9	2.2	0.49	1.7	1.51 ± 1.18 (78)
La	0.09	0.08	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.05	0.05	0.03	0.06 ± 0.02 (33)
Ce	0.05	0.03	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05 ± 0.01 (20)
Pr	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.01	0.05 ± 0.01 (20)
Nd	0.06	0.02	0.05	0.01	0.05	0.03	0.01	0.05	0.05	0.08	0.04 ± 0.02 (50)
Sm	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.03	0.08	0.05	0.05	0.01	0.05 ± 0.02 (40)
Gd	0.06	0.05	0.05	5	0.16	0.07	0.2	0.05	0.05	0.21	0.59 ± 1.55 (263)
Dy	0.05	0.05	0.05	0.05	0.001	0.05	0.01	0.05	0.01	0.05	0.04 ± 0.02 (50)
Er	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05 ± 0.004 (80)
Yb	0.05	0.05	0.05	0.07	0.13	0.08	0.05	0.02	0.05	0.02	0.06 ± 0.03 (50)
Сумма элементов АБ Sum of AB elements	23.8	3.49	11.63	17.54	6.41	2.61	13.8	17.85	6.06	16.67	11.54 ± 7.12 (62)
Итого / Total	7698.09	1697.98	4170.7	2274.35	1202.02	884.71	4176.63	4017.97	2705.61	6803.76	3563.18 ± 2289.49 (64)

ментами превышает таковую в базовых органических субстанциях в 10–850 раз в последовательности «бактерии < наземные растения < живое вещество < наземные животные». Относительно земной коры моча в среднем немного уступает по физиогенно-активным микроэлементам, но в 10 раз превышает по эссенциальным (рис. 13).

Таким образом, получается, что моча у пациентов с мочекаменной болезнью по валовой концентрации аномально обогащена органофильными микроэлементами как относительно камней, так и эталонных органических субстанций. При этом в ней многократно преобладают не физиогенно-активные, как в камнях, а эссенциальные элементы.

В образцах мочи-2 пациентов с пиелонефритом тоже выявлен 41 микроэлемент, к определяющим сумму элементов в этом случае относятся $Ge > Sc > Te > Rb > Cd > Li$. В составе 9 лантаноидов содержание элементов иттриевой подгруппы преобладает над содержанием элементов цериевой подгруппы в 9 раз (табл. 16). По валовому содержанию микроэлементов рассматриваемая моча уступает почечным камням почти в два раза, а моче пациентов с мочекаменной болезнью — в 49 раз. Доля (%) групп элементов-органов в образцах мочи-2 составляет в среднем для эссенциальных микроэлементов — 75, физиогенно-активных — 23, элементов-антибионтов — 2. То есть в составе мочи пациентов с пиелонефритом, так же как и в моче пациентов с мочекаменной болезнью, абсолютно преобладают элементы-эссенциалы при ничтожной доле элементов-антибионтов. Согласно вычисленным кларкам концентрации, степень обогаще-

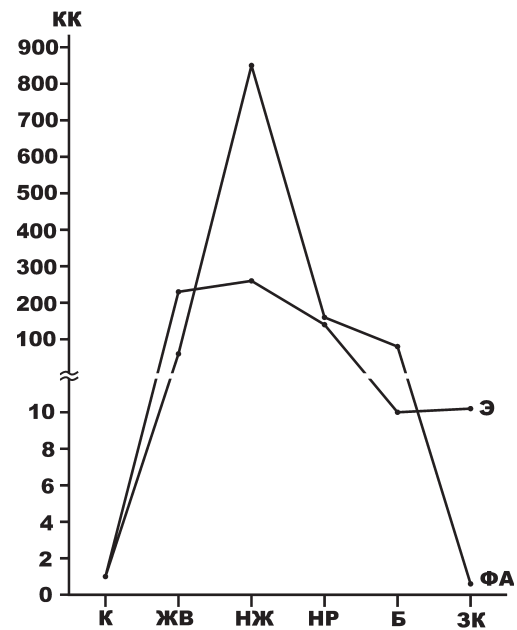


Рис. 13. Усредненные кларки концентрации микроэлементов в образцах мочи-1. Объекты сопоставления (по: Войткевич, Кокин, 1990): К — мочевые камни, ЖВ — живое вещество, НЖ — наземные животные, НР — наземные растения, Б — бактерии, ЗК — земная кора

Fig. 13. Averaged clark values of microelement concentrations in urine-1 samples. Objects of comparison (according to: Voitkevich, Kokin, 1990): К — urinary stones, ЖВ — living matter, НЖ — terrestrial animals, НР — terrestrial plants, Б — bacteria, ЗК — earth's crust

Таблица 16. Содержание микроэлементов (г/л) в образцах мочи-2 пациентов с пиелонефритом (11, 12)

Table 16. Content of trace elements (g/l) in urine-2 samples of patients with pyelonephritis (11, 12)

Элементы / Elements	Пациенты / Patients		Статистика / Statistics: $X \pm S_x$
	11	12	
Li	0.5	4.17	0.34 ± 2.59
Be	0.02	0.08	0.05 ± 0.04
As	21.06	28.64	24.85 ± 5.36
Se	0.49	0.16	0.33 ± 0.23
Rb	6.5	6	6.25 ± 0.35
Zn	1.63	3.75	2.69 ± 1.5
Mo	10.5	13.5	12 ± 2.12
Ag	1.26	0.45	0.86 ± 0.57
Cd	8.33	0.83	4.58 ± 5.3
Pb	0.15	0.05	0.1 ± 0.07
Th	0.009	0.007	0.008 ± 0.001
Сумма элементов Э Sum of E elements	50.45	57.64	54.04 ± 5.08
Hf	0.04	0.01	0.025 ± 0.02
Sn	0.01	0.05	0.03 ± 0.03
Sb	1.38	1.1	1.24 ± 0.2
Te	5	18	11.5 ± 9.19
Cs	0.36	0.75	0.56 ± 0.28
Ba	0.003	0.0001	0.002 ± 0.002
Sr	0.53	0.38	0.46 ± 0.11
Y	9.001	0.002	4.5 ± 0.36
Zr	0.005	0.007	0.006 ± 0.001
Ga	0.2	0.33	0.27 ± 0.09
Ti	0.38	0.55	0.47 ± 0.12
V	1.38	1.77	1.58 ± 0.28
Cr	0.6	0.35	0.48 ± 0.18
Co	0.05	0.02	0.04 ± 0.02
Ni	0.14	0.11	0.13 ± 0.02
Cu	0.19	0.001	0.1 ± 0.13



Продолжение таблицы 16
Continuation of table 16

Элементы / Elements	Пациенты / Patients		Статистика / Statistics: $X \pm S_x$
	11	12	
Сумма элементов ФА Sum of PA elements	19.27	23.43	21.35 ± 2.94
Nb	0.003	0.003	0.03
W	0.03	0.025	0.027 ± 0.004
Tl	0.07	0.04	0.055 ± 0.021
Ge	0.2	0.45	0.325 ± 0.177
Sc	0.21	0.4	0.305 ± 0.134
La	0.001	0.001	0.001
Ce	0.001	0.001	0.001
Pr	0.01	0.0002	0.005 ± 0.007
Nd	0.004	0.004	0.004
Sm	0.01	0.008	0.009 ± 0.001
Gd	0.065	0.023	0.044 ± 0.03
Dy	0.053	0.011	0.032 ± 0.03
Er	0.02	0.02	0.02
Yb	0.133	0.016	0.07 ± 0.08
Сумма элементов АБ Sum of AB elements	0.81	1.0	0.9 ± 0.14
Итого / Total	70.53	82.07	76.29 ± 8.16

ния мочи-2 эссенциальными микроэлементами превышает кларки в большинстве органических субстанций в 18–45 раз в последовательности «наземные растения < живое вещество < наземные животные». Рассматриваемая моча почти на два порядка уступает земной коре по содержанию элементов-антибионтов и в 5 раз — по содержанию физиогенно-активных элементов, но в 1.5 раза превосходит ее по элементам-эссенциалам (рис. 14).

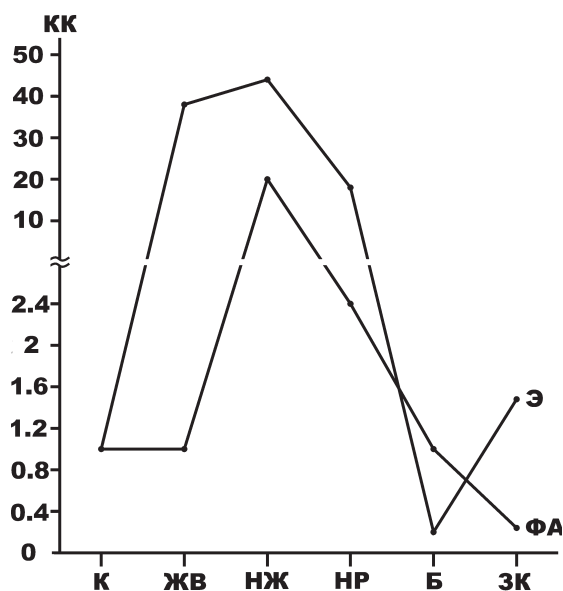


Рис. 14. Усредненные кларки концентрации микроэлементов в образцах мочи-2. Объекты сопоставления (по: Voitkevich, Kokin, 1990): К — мочевые камни, ЖВ — живое вещество, НЖ — наземные животные, НР — наземные растения, Б — бактерии, ЗК — земная кора

Fig. 14. Averaged clark values of microelement concentrations in urine-2 samples. Objects of comparison (according to: Voitkevich, Kokin, 1990): К — urinary stones, ЖВ — living matter, НЖ — terrestrial animals, НР — terrestrial plants, Б — bacteria, ЗК — earth's crust

Белковые аминокислоты

Важное значение в современных исследованиях органического вещества имеет анализ аминокислотного состава их белков (Амосова, Машина, 2020; Амосова, Шанина, 2018; Анищенко, Шанина, 2009, 2010; Бельская, Голованова, 2007; Изатулина, Голованова, 2007; Каткова, Симаков, 1998; Каткова, Шанина, 2019; Котельникова, 2018; Машина, Шанина, 2022; Шанина, Бушнев, 2016; Шанина, Голубев, 2022; Юшкин, 1999; Юшкин, Бушнев, 2006; Fuch, Berger, 2005; Kimura, Namase, 2016). В рамках нашего исследования аминокислотный состав органического вещества определялся в мочевых камнях, образцах мочи-1 и мочи-2, а также непосредственно в белках мочи-1.

В мочевых камнях установлено 15 аминокислот, в том числе 7 незаменимых (табл. 17). Сумма содержания всех кислот колеблется в пределах 13–37 мг/г, незаменимых — 4.67–14.38 мг/г. Размах колебаний групповых концентраций составляет в среднем около 15. Среднестатистический коэффициент вариации содержания аминокислот составляет (59 ± 23) %. Доля незаменимых кислот составляет в среднем 0.85. Последовательность снижения концентрации групп аминокислот: алифатические > кислые > имино > ароматические > гидроксильные > основные > алифатические серосодержащие. Аналогичный ряд для незаменимых кислот: лейцин > метионин > лизин > фенилаланин > треонин > валин > изолейцин. В нашем случае, что характерно для органического вещества в организме человека (Каткова, Шанина, 2019), только три аминокислоты — аланин, аспарагиновая и глутаминовая кислоты — представлены обоими энантиомерами, отношения D/L (показатель хиральности) составляют в них соответственно 0–0.013, 0.038–0.055, 0–0.011.

В образцах мочи-1 установлены те же аминокислоты (табл. 18). Сумма содержания всех кислот варьируется в пределах 0.0552–0.4407 мг/г, а незаменимых кислот — 0.0235–0.1913 мг/г, что уступает данным для камней соответственно в 84–235 и 75–199 раз. Размах колебаний групповых концентраций аминокислот со-



Таблица 17. Содержание белковых аминокислот в мочевых камнях, мг/г

Table 17. Content of protein amino acids in urinary stones, mg/g

Аминокислоты / Amino acids	Объекты / Objects				X ± S _x , (V _x , %)
	2	4	6	7	
Глицин / Glycine	2.464	2.001	0.836	2.606	1.977 ± 0.803 (41)
L-аланин / L-alanine	0.677	3.36	0.987	1.273	1.574 ± 1.215 (77)
D-аланин / D-alanine	0	0	0.013	0.016	0.007 ± 0.008 (114)
L-валин* / L-valine*	0.822	1.456	0.469	1.107	0.964 ± 0.419 (43)
L-лейцин* / L-leucine*	1.46	4.031	1.247	2.231	2.242 ± 1.265 (56)
L-изолейцин* / L-isoleucine*	0.334	1.048	0.303	0.475	0.54 ± 0.347 (64)
Алифатические / Aliphatic	5.757	11.896	3.855	7.708	7.304 ± 3.442 (47)
L-метионин* / L-methionine*	0	1.416	0.306	0.235	2.086 ± 0.632 (30)
Алифатические серосодержащие / Aliphatic sulfur-containing	0	1.416	0.306	0.235	0.489 ± 0.632 (30)
L-фенилаланин* / L-phenylalanine*	0.764	2.059	0.725	1.096	1.161 ± 0.621 (53)
L-тирозин / L-tyrosine	0.806	3.72	1.225	1.462	1.803 ± 1.306 (72)
Ароматические / Aromatic	1.57	5.779	1.95	2.558	2.964 ± 1.92 (65)
L-лизин* / L-lysine*	0.764	3.593	1.314	1.946	1.904 ± 1.225 (64)
Основные / Essential	0.764	3.593	1.314	1.946	1.904 ± 1.225 (64)
L-аспарагиновая кислота / L-aspartic acid	1.107	3.201	1.335	1.665	1.827 ± 0.944 (52)
D-аспарагиновая кислота / D-aspartic acid	0.042	0.127	0.053	0.091	0.078 ± 0.039 (50)
L-глутаминовая кислота / L-glutamic acid	1.634	5.307	1.749	3.368	3.14 ± 1.721 (55)
D-глутаминовая кислота / D-glutamic acid	0	0.046	0	0.036	0.021 ± 0.024 (114)
Кислые / Acidic	2.783	8.682	3.137	0.297	3.725 ± 3.539 (95)
L-серин / L-serine	1.14	2.553	0.904	1.393	1.498 ± 0.731 (49)
L-треонин* / L-threonine*	0.862	1.829	0.642	1.179	1.128 ± 0.517 (46)
Гидроксильные / Hydroxyl	2.002	4.382	1.546	2.572	2.625 ± 1.243 (47)
L-пролин / L-proline	0.726	1.282	0.637	1.048	0.923 ± 0.297 (32)
Гидрокси-L-пролин / Hydroxy-L-proline	0.123	0	0.077	0.194	0.098 ± 0.081 (83)
Имино / Imino	0.849	1.282	0.714	1.242	1.022 ± 0.283 (28)
Сумма / Total	13.725	37.029	12.822	24.558	22.034 ± 11.33 (51)

Примечание. Звездочкой отмечены незаменимые кислоты, жирным шрифтом — группы аминокислот.

Note. Essential acids are marked with an asterisk; amino acid groups are shown in bold.

Таблица 18. Содержание аминокислот в образцах мочи-1, мг/г

Table 18. Amino acid content in urine-1 samples, mg/g

Аминокислоты / Amino acids	Объекты / Objects										X ± S _x , (V _x , %)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Глицин / Glycine	0.0048	0.0096	0.0112	0.012	0.0081	0.021	0.0041	0.0124	0.0037	0.007	0.0094 ± 0.0051 (55)
L-аланин / L-alanine	0.0097	0.0206	0.0115	0.0256	0.0118	0.0448	0.0106	0.0135	0.0096	0.0157	0.0173 ± 0.0109 (63)
D-аланин / D-alanine	0.001	0.0006	0.0009	0.0014	0.0009	0.0011	0	0	0.0003	0.0009	0.0007 ± 0.0005 (66)
L-валин* / L-valine*	0.0019	0.0294	0.0034	0.0104	0.0023	0.0244	0.0149	0.0033	0.0016	0.0034	0.0095 ± 0.0102 (185)
L-лейцин* / L-leucine*	0.0043	0.0146	0.008	0.0215	0.0053	0.0517	0.006	0.008	0.0038	0.0094	0.0133 ± 0.0145 (100)
L-изолейцин* / L-isoleucine*	0.0012	0.0053	0.0017	0.0062	0.001	0.0123	0.0006	0.0012	0.0008	0.0026	0.0033 ± 0.0037 (113)
Алифатические / Aliphatic	0.0229	0.0801	0.0367	0.0771	0.0294	0.1553	0.0331	0.0364	0.198	0.039	0.0739 ± 0.0664 (90)
L-метионин* / L-methionine*	0.0058	0.0137	0.0043	0.0063	0	0	0.0035	0	0.0086	0.0053	0.0048 ± 0.0043 (91)
Алифатические серосодержащие / Aliphatic sulfur-containing	0.0058	0.0137	0.0043	0.0063	0	0	0.0035	0	0.0086	0.0053	0.0048 ± 0.0043 (91)
L-фенилаланин* / L-phenylalanine*	0.003	0.0078	0.0046	0.0132	0.0032	0.0285	0.002	0.0057	0.0031	0.0056	0.0077 ± 0.0008 (104)
L-тирозин / L-tyrosine	0.0019	0.0021	0.0055	0.013	0.0038	0.0355	0.0007	0.0075	0.002	0.0074	0.0079 ± 0.0104 (131)
Ароматические / Aromatic	0.0049	0.0099	0.0101	0.0262	0.007	0.064	0.0027	0.0132	0.0051	0.013	0.0156 ± 0.0182 (117)



Продолжение таблицы 18

Continuation of table 18

Аминокислоты Amino acids	Объекты / Objects										$X \pm S_x (V_x, \%)$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
L-лизин* L-lysine*	0.0054	0.0128	0.0135	0.0277	0.0077	0.0482	0.0024	0.0162	0.0057	0.0154	0.0155 ± 0.0136 (88)
Основные Essential	0.0054	0.0128	0.0135	0.0277	0.0077	0.0482	0.0024	0.0162	0.0057	0.0154	0.0155 ± 0.0136 (88)
L-аспарагиновая кислота L-aspartic acid	0.003	0.011	0.008	0.0192	0.0057	0.0358	0.0021	0.0063	0.0033	0.0087	0.0103 ± 0.0102 (99)
D-аспарагиновая кислота D-aspartic acid	0.0001	0.0004	0.0003	0.0006	0	0.0009	0	0	0	0.0002	0.0002 ± 0.0003 (124)
L-глутаминовая кислота L-glutamic acid	0.0063	0.0171	0.0132	0.029	0.0103	0.0544	0.0057	0.0131	0.0071	0.0143	0.0171 ± 0.0148 (87)
D-глутаминовая кислота D-glutamic acid	0.0001	0.001	0.0009	0.0014	0	0	0	0	0	0.0011	0.0004 ± 0.0006 (127)
Кислые / Acidic	0.0095	0.0295	0.0224	0.0502	0.016	0.0911	0.0078	0.0194	0.0104	0.0243	0.0281 ± 0.0254 (90)
L-серин / L-serine	0.003	0.0075	0.009	0.0123	0.0068	0.0307	0.0024	0.0053	0.0035	0.0062	0.0087 ± 0.0083 (96)
L-треонин* L-threonine*	0.0019	0.0069	0.0043	0.0109	0.0022	0.0262	0.0019	0.003	0.0069	0.0048	0.0075 ± 0.0076 (102)
Гидроксильные Hydroxyl	0.0049	0.0144	0.0133	0.0232	0.009	0.0569	0.0043	0.0083	0.0104	0.011	0.0156 ± 0.0155 (99)
L-пролин L-proline	0.0026	0.0067	0.0048	0.0116	0.0029	0.0236	0.0014	0.0037	0.0024	0.0045	0.0064 ± 0.0067 (104)
Гидрокси- L-пролин Hydroxy-L-proline	0.0005	0.0007	0.0006	0.0015	0.0009	0.0016	0	0.0008	0.0007	0.0008	0.0008 ± 0.0005 (57)
Имино / Imino	0.0031	0.0074	0.0054	0.0131	0.0038	0.0252	0.0014	0.0045	0.0031	0.0053	0.0072 ± 0.0071 (98)
Сумма / Total	0.0565	0.1678	0.1057	0.2238	0.0729	0.4407	0.0552	0.098	0.2413	0.1133	0.1575 ± 0.1191 (76)

ставляет в среднем около 10. Среднестатистический коэффициент вариации содержаний кислот составляет $(93 \pm 33) \%$. Доля незаменимых кислот определяется в среднем как 0.93, т. е. в моче пациентов с мочекаменной болезнью доля незаменимых аминокислот выше, чем в собственно камнях. Последовательность снижения концентраций групп аминокислот: алифатические > кислые > ароматические > гидроксильные > основные > имино > алифатические серосодержащие. Этот ряд почти совпадает с аналогичным рядом для камней, отличаясь только дефицитом группы имино. Последовательность снижения концентраций незаменимых кислот имеет в рассматриваемом случае следующий вид: лизин > лейцин > валин > фенилаланин > треонин > метионин > изолейцин. То есть моча-1 отличается от камней дефицитом метионина. Так же как в камнях, в этой моче аланин, аспарагиновая и глутаминовая кислоты представлены обоими энантиомерами, отношения D/L в них составляют соответственно 0—0.103, 0—0.038, 0—0.159.

В собственно белках мочи-1 (табл. 19) сумма содержаний всех аминокислот достигает 27.74—286.43 мг/г, а незаменимых — 11.55—124.28 мг/г, что превышает данные для камней соответственно в 2—8 и 2.5—9 раз, а для мочи-1 соответственно в 533—650 и 491—650 раз. Размах колебаний групповых концентраций составля-

ет в среднем около 10. Среднестатистический коэффициент вариации содержаний аминокислот оценивается в $(92 \pm 27) \%$. Доля незаменимых кислот в проанализированных белках составляет в среднем 0.42, что гораздо ниже, чем в моче-1 и камнях. Последовательность снижения концентрации групп аминокислот в мочевых белках: алифатические > кислые > ароматические > основные > гидроксильные > имино > алифатические серосодержащие. Это практически совпадает с последовательностью в моче. Аналогичная последовательность незаменимых кислот в белках тождественна таковой в моче: лизин > лейцин > валин > фенилаланин > треонин > метионин > изолейцин. В мочевых белках, так же как в камнях и моче, аланин, аспарагиновая и глутаминовая кислоты представлены обоими энантиомерами, отношения D/L в них составляют соответственно 0—0.105, 0—0.04, 0—0.07.

В образцах мочи-2 больных хроническим пиелонефритом (табл. 20) установлен тот же набор аминокислот. Сумма содержаний всех аминокислот составляет 0.0974—0.233 мг/г, что в 1.5 раза меньше, чем в моче-1. Размах колебаний групповых концентраций достигает в среднем 19, что почти в два раза больше, чем в моче-1. Среднестатистический коэффициент вариации содержаний аминокислот определяется как $82 \pm 37 \%$, что уступает такому показателю в моче-1. Сумма

Таблица 19. Содержание аминокислот непосредственно в белках образцов *мочи-1*, мг/г

Table 19. Content of amino acids directly in proteins of *urine-1* samples, mg/g

Аминокислоты Amino acids	Объекты / Objects										$X \pm S_x (V_x, \%)$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Глицин / Glycine	2.37	4.72	6.03	6.84	13.95	13.67	5.99	4.05	4.5	3.9	6.002 ± 4.005 (67)
L-аланин / L-alanine	4.76	10.14	6.16	14.59	20.29	29.12	15.5	4.41	11.71	8.81	12.549 ± 7.714 (61)
D-аланин / D-alanine	0.5	0.28	0.47	0.82	1.48	0.71	0	0	0.37	0.5	0.513 ± 0.431 (84)
L-валин* / L-valine*	0.92	14.49	1.83	5.95	3.88	15.87	21.77	1.08	1.91	1.93	6.963 ± 7.558 (108)
L-лейцин* / L-leucine*	2.12	7.21	4.26	12.26	9.16	33.61	4.28	1.96	4.63	5.3	8.479 ± 9.376 (111)
L-изолейцин* / L-isoleucine*	0.57	2.62	0.9	3.56	1.64	7.99	0.92	0.39	1.03	1.46	2.108 ± 2.284 (108)
Алифатические Aliphatic	11.24	39.46	19.68	44.02	50.4	100.97	48.46	11.89	24.15	21.9	37.217 ± 26.761 (72)
L-метионин* / L-methionine*	2.86	6.72	2.33	3.6	0	0	5.15	0	10.54	3.0	3.42 ± 3.356 (98)
Алифатические серосодержащие Aliphatic sulfur-containing	2.86	6.72	2.33	3.6	0	0	5.15	0	10.54	3.0	3.42 ± 3.356 (98)
L-фенилаланин* L-phenylalanine*	1.45	3.86	2.45	7.53	5.55	18.49	2.96	1.85	3.77	3.15	5.106 ± 5.033 (99)
L-тирозин / L-tyrosine	0.91	1.02	2.97	7.44	6.46	23.07	1.04	2.45	2.5	4.16	5.202 ± 6.667 (128)
Ароматические / Aromatic	2.36	4.88	5.42	14.97	12.01	41.56	4.0	4.3	6.27	7.31	10.808 ± 8.489 (108)
L-лизин* / L-lysine*	2.67	6.28	7.21	15.8	13.15	31.31	3.47	5.31	6.98	8.63	10.081 ± 8.489 (84)
Основные / Essential	2.67	6.28	7.21	15.8	13.15	31.31	3.47	5.31	6.98	8.63	10.611 ± 8.827 (83)
L-аспарагиновая кислота L-aspartic acid	1.46	5.43	4.26	10.92	9.73	23.24	3.02	2.04	3.98	4.89	6.897 ± 6.507 (94)
D-аспарагиновая кислота D-aspartic acid	0.06	0.17	0.16	0.36	0	0.61	0	0	0	0.1	0.146 ± 0.199 (136)
L-глутаминовая кислота L-glutamic acid	3.09	8.44	7.08	16.53	17.67	35.37	8.28	4.27	8.69	8.03	11.745 ± 9.515 (81)
D-глутаминовая кислота D-glutamic acid	0.06	0.48	0.46	0.82	0	0	0	0	0	0.61	0.243 ± 0.316 (130)
Кислые / Acidic	4.67	14.52	11.96	28.63	27.4	59.22	11.3	6.31	12.67	13.67	19.035 ± 16.141 (85)
L-серин / L-serine	1.48	3.69	4.83	7.0	11.67	19.95	3.53	1.74	4.32	3.5	6.171 ± 5.656 (92)
L-треонин* / L-threonine*	0.96	3.39	2.32	6.19	3.74	17.01	2.76	0.97	2.3	2.71	4.404 ± 4.984 (113)
Гидроксильные Hydroxyl	2.44	7.08	7.15	13.19	15.41	36.96	6.29	2.71	6.62	6.21	10.406 ± 10.171 (98)
L-пролин / L-proline	1.27	3.28	2.6	6.61	4.91	15.35	1.97	1.2	2.99	2.53	4.271 ± 4.227 (99)
Гидрокси-L-пролин Hydroxy-L-proline	0.23	0.32	0.35	0.88	1.54	1.06		0.25	0.84	0.45	0.658 ± 0.451 (68)
Имино / Imino	1.5	3.6	2.95	7.49	6.45	16.41	1.97	1.45	3.83	2.98	4.863 ± 4.521 (93)
Сумма / Total	27.74	82.54	56.7	127.7	124.82	286.43	80.64	31.97	71.06	63.66	95.326 ± 74.895 (78)
Масса белка в исследованных образцах, г Protein mass in the studied samples, g	0.002	0.002	0.0019	0.0021	0.0005	0.0013	0.0006	0.0017	0.0007	0.0022	0.002 ± 0.0007

Таблица 20. Содержание аминокислот в образцах *мочи-2*, мг/г

Table 20. Amino acid content in *urine-2* samples, mg/g

Аминокислоты / Amino acids	Образцы / Samples		$X \pm S_x (V_x, \%)$
	11	12	
Глицин / Glycine	0.006	0.013	0.0095 ± 0.0049 (52)
L-аланин / L-alanine	0.0141	0.037	0.0255 ± 0.0162 (63)
D-аланин / D-alanine	0	0.0015	0.0007 ± 0.0011 (141)
L-валин* / L-valine*	0.0122	0.0106	0.0114 ± 0.0011 (10)
L-лейцин* / L-leucine*	0.0064	0.0211	0.0137 ± 0.0104 (75)
L-изолейцин* / L-isoleucine*	0.0019	0.0064	0.0041 ± 0.0032 (77)
Алифатические / Aliphatic	0.0406	0.0896	0.0651 ± 0.0346 (53)
L-метионин* / L-methionine*	0.0012	0.0057	0.0034 ± 0.0032 (92)
Алифатические серосодержащие / Aliphatic sulfur-containing	0.0012	0.0057	0.0034 ± 0.0032 (92)
L-фенилаланин* / L-phenylalanine*	0.004	0.0118	0.079 ± 0.0055 (70)
L-тирозин / L-tyrosine	0.0004	0.0135	0.0069 ± 0.0093 (133)
Ароматические / Aromatic	0.0044	0.0253	0.0148 ± 0.0148 (99)



Аминокислоты / Amino acids	Образцы / Samples		X ± S _x (V _x , %)
	11	12	
L-лизин* / L-lysine*	0.0027	0.0217	0.0122 ± 0.0134 (110)
Основные / Essential	0.0027	0.0217	0.0122 ± 0.0134 (110)
L-аспарагиновая кислота / L-aspartic acid	0.0034	0.0186	0.011 ± 0.0107 (98)
D-аспарагиновая кислота / D-aspartic acid	0	0.0006	0.0003 ± 0.0004 (140)
L-глутаминовая кислота / L-glutamic acid	0.0069	0.0259	0.0164 ± 0.0134 (82)
D-глутаминовая кислота / D-glutamic acid	0	0	0
Кислые / Acidic	0.0103	0.0554	0.0328 ± 0.0319 (97)
L-серин / L-serine	0.0039	0.0129	0.0084 ± 0.0064 (76)
L-треонин* / L-threonine*	0.032	0.0116	0.0218 ± 0.0144 (66)
Гидроксильные / Hydroxyl	0.0359	0.0245	0.0302 ± 0.0081 (27)
L-пролин / L-proline	0.0023	0.01	0.0061 ± 0.005 (82)
Гидрокси-L-пролин / Hydroxy-L-proline	0	0.0009	0.0005 ± 0.0006 (142)
Имино / Imino	0.0023	0.0109	0.0066 ± 0.0061 (92)
Сумма / Total	0.0974	0.233	0.1652 ± 0.0959 (58)

содержаний независимых кислот в моче-2 составляет 0.0384—0.1109 мг/г, что дает 0.88 общего баланса аминокислот. Это ниже, чем в моче-1. Последовательность снижения концентрации групп аминокислот: алифатические > кислые > гидроксильные > ароматические > основные > имино > алифатические серосодержащие. Здесь в сравнении с образцами мочи-1 поменялись местами гидроксильные (их стало больше) и ароматические кислоты. Последовательность незаменимых аминокислот в моче-2 специфична: треонин > лейцин > лизин > валин > фенилаланин > > изолейцин > метионин. Здесь особенность состоит в том, что в моче-2 наибольшее содержание не у алифатической, а у гидроксильной незаменимой кислоты. Кроме того, в этой моче только две аминокислоты — аланин и аспарагиновая кислота — представлены обоими энантиомерами, отношения D/L в них составляют соответственно 0—0.0415 и 0—0.032.

Обобщение полученных данных приводит к следующему выводу. Среди исследованных объектов по свойствам аминокислотности объединяются три, относящиеся к пациентам с мочекаменной болезнью и образующие более или менее упорядоченную последовательность: белки мочи-1 → мочевые камни → моча-1. В направлении этой последовательности более или менее упорядоченно снижается сумма содержаний аминокислот (очень резко при переходе к моче), аналогичным образом падает сумма содержаний незаменимых кислот, возрастает доля незаменимых кислот в их общей сумме. Последовательности снижения концентраций групп аминокислот в белках мочи-1 и собственно моче-1 практически тождественны, а в мочевых камнях концентрация отличается аномально высоким содержанием метионина. Аналогично ведут себя величина колебаний содержаний кислот (достигает максимума в камнях) и коэффициентов их вариации (минимален в камнях). Степень хиральности в аланине, аспарагиновой и глутаминовой кислотах минимальна и примерно одинакова. Как известно, это свойство аминокислот в живых организмах и минерализациях часто объясняют старением (Huskic, Resov, 2016; Hassan, Jaleel, 2014). Однако в нашем случае корреляции между возрастом пациентов и степенью хиральности не выявляется. Вероятной причи-

ной появления D-энантиомера в аминокислотах изученных образцов может являться участие в жизнедеятельности человека бактерий, в аминокислотах которых всегда есть D-энантиомеры (Машина, Шанина, 2022).

Остается отметить особенности аминокислотного состава образцов мочи-2 пациентов с хроническим пиелонефритом. В этом случае суммарное содержание аминокислот и содержание незаменимых кислот примерно совпадают с таковыми в образцах мочи-1, но значительно (почти в 2 раза) возрастает размах колебаний содержаний, увеличивается групповая доля гидроксильных аминокислот и особенно резко возрастает содержание треонина среди незаменимых кислот.

Изотопия

Изотопный состав углерода и азота определялся в органическом веществе мочевых камней и моче-1 пациентов с мочекаменной болезнью (табл. 21), а также моче-2 пациентов с хроническим пиелонефритом (табл. 22). Согласно полученным данным (рис. 15), мочевые камни характеризуются относительно изотопно-тяжелым составом углерода, но изотопно-легким составом азота. Моча-1 более изотопно-легкая по углероду, но более изотопно-тяжелая по азоту. Моча-2 наиболее изотопно-легкая по углероду и изотопно-легкая на уровне мочевых камней по азоту. В целом исследованные нами объекты по изотопному составу весьма специфичны и отличаются как от органического вещества человеческих костей — гораздо более изотопно-тяжелые по азоту (Силаев, Белицкая, 2019), ископаемых копролитов — более изотопно-тяжелые по углероду (Силаев, Юшкин, 2019), так и от земной атмосферы ($\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} = -5...-8 \text{ ‰}$; $\delta^{15}\text{N}_{\text{AIR}} = 5-8 \text{ ‰}$) и углеродного вещества в осадочных горных породах ($\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} = -15-2 \text{ ‰}$; $\delta^{15}\text{N}_{\text{AIR}} = \text{от } -12 \text{ до } 12 \text{ ‰}$) (Силаев, Смолева, 2012). Как ни странно, но наиболее близкими к изученному органическому веществу по изотопным данным оказались выявленные нами в продуктах современного вулканизма абиогенные органические полимеры, в которых $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ лежит в пределах $-27...-25 \text{ ‰}$ (Силаев, Аникин, 2018).

Таблица 21. Изотопный состав углерода и азота в органическом веществе мочевых камней и мочи-1, ‰
Table 21. Isotopic composition of carbon and nitrogen in the organic matter of urinary stones and urine-1, ‰

№ обр. / Sample No.	Камни / Stones		Моча-1 / Urine-1	
	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$	$\delta^{15}\text{N}_{\text{AIR}}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$	$\delta^{15}\text{N}_{\text{AIR}}$
1	-23.46	7.86	-24.59	6.04
2	-19.08	-1.05	-24.55	6.37
3	-22.32	4.62	-22.05	7.35
4	-21.89	н. о.	-25.41	7.99
5	-19.72	-0.89	-22.58	11.47
6	-21.11	-6.8	-23.8	н. о.
7	-19.56	-1.33	-23.16	2.45
8	-21.83	2.91	-23.78	3.58
9	-21.88	0.29	-22.71	10.69
10	-17.91	0.02	-24.38	4.37
Среднее / Average	-20.88	2.14	-23.7	6.7
СКО / SD	1.73	3.54	1.06	3.05
V, %	8.3	165.4	4.5	45.5
Коэффициент корреляции Correlation coefficient	-0.57		0.11	

Таблица 22. Изотопный состав углерода и азота в органическом веществе мочи-2, ‰
Table 22. Isotopic composition of carbon and nitrogen in organic matter of urine-2, ‰

№ обр / Sample No.	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$	$\delta^{15}\text{N}_{\text{AIR}}$
11	-25.29	1.37
12	-26.12	3.93
Среднее / Average	-25.7	2.65
СКО / SD	0.58	1.81
V _x , %	2.3	68.3

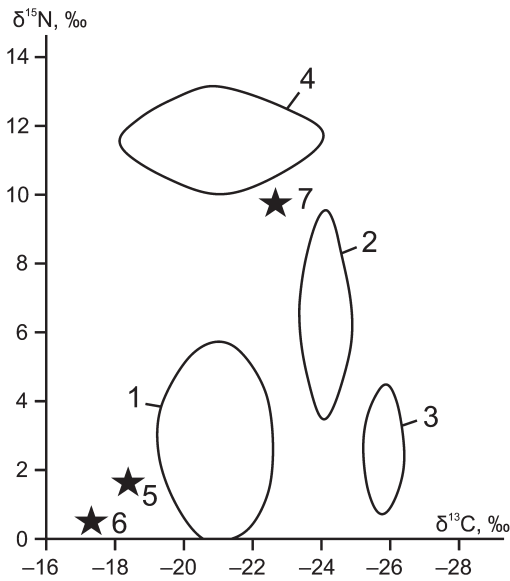


Рис. 15. Статистика изотопного состава углерода и азота в органическом веществе мочевых камней и образцах мочи: 1 — мочевые камни; 2 — моча пациентов с мочекаменной болезнью; 3 — моча пациентов с хроническим пиелонефритом; 4 — кости человека; 5—7 — мочевые камни сульфатно-уратно-фосфатные (5), уратно-сульфатно-фосфатные (6) и опал-фосфатные (7) (по: Силаев, Кокин, 2021)

Fig. 15. Statistics of the isotopic composition of carbon and nitrogen in the organic matter of urinary stones and urine samples: 1 — urinary stones; 2 — urine of patients with urolithiasis; 3 — urine of patients with chronic pyelonephritis; 4 — human bones; 5—7 — sulfate-urate-phosphate (5), urate-sulfate-phosphate (6) and opal-phosphate (7) urinary stones (according to: Silaev, Kokin, 2021)

Заключение

С использованием широкого комплекса минералогических и физико-химических методов изучена эталонная коллекция образцов мочевых камней мужчин и женщин в возрасте 27—83 лет и мочи пациентов с мочекаменной болезнью и хроническим пиелонефритом. Мочевые камни характеризуются преимущественно светлой окраской и округлой формой, широко варьируются по внутреннему строению. В их составе выявлено до 14 фаз: органическое вещество с урицитом и эритроцитами, водные кальциевые оксалаты, силикаты и алюмосиликаты, металлоорганические соединения, металлические фазы, гидросульфаты и фосфаты, биоапатит, фосфатосульфаты бария, сульфиды, гидрокси- и гидроген-хлориды, сульфато-силикатофосфаты, магнетит, кремниевая фаза. По характеру распределения выявленных фаз исследуемые мочевые камни подразделяются на два типа: 1) многофазные (от 6 до 14), равномерно распределенные между мужчинами и женщинами в возрасте 27—83 лет; 2) ограниченно-фазные (3—5), преимущественно мужские. В целом обнаруженные в составе мочевых камней биоминералы охватывают практически всю современную номенклатуру минеральных типов. Исследованная моча состояла на 75—77 % из воды, в состав примесей входили Cl, SO₃, P₂O₅, FeO, Na₂O, K₂O, CaO, MgO, NH₄ — важнейшие компоненты и мочевых камней.

В мочевых камнях выявлены 18 микроэлементов, почти исключительно органофильных: 46 % — эссенциальные, 54 % физиогенно-активные. В моче-1 обнаружен 41 органофильный микроэлемент с сильным преобладанием (86 %) эссенциальных элементов. По степени суммарного обогащения микроэле-



ментами моча-1 преобладает над мочевыми камнями в 26 раз. В моче-2 установлен также 41 органогфильный микроэлемент с преобладанием (75 %) эссенциальных элементов. По степени суммарного обогащения микроэлементами образцы мочи-2 в два раза уступают мочевым камням и в 49 раз — образцам мочи-2.

Исследованные объекты, относящиеся к пациентам с мочекаменной болезнью, по свойствам белковых аминокислот образуют довольно упорядоченную последовательность: белки мочи-1 → мочевые камни → моча-1. В направлении этой последовательности снижается сумма содержаний аминокислот (очень резко при переходе к моче), аналогичным образом падает сумма содержаний незаменимых кислот, но возрастает их доля в общей сумме аминокислот. Очевидно, что это обусловлено последовательностью снижения в объектах содержания белков. Последовательности снижения концентраций групп аминокислот в белках мочи-1 и собственно моче-1 практически тождественны, а в мочевых камнях аналогичная последовательность отличается только аномально высоким содержанием метионина. Аналогично ведут себя размах колебаний содержаний кислот (достигает максимума в камнях) и коэффициент их вариации (минимален в камнях). Степень хиральности в аланине, аспарагиновой и глутаминовой кислотах минимальна и примерно одинакова. Вероятной причиной появления D-энантиомера в аминокислотах изученных образцов может являться участие в жизнедеятельности человека бактерий. В целом информация об аминокислотном составе свидетельствует о высокой степени сходства мочи-1 и мочевых камней. В образцах мочи-2 пациентов с хроническим пиелонефритом суммарное содержание аминокислот и содержание незаменимых кислот примерно совпадают с таковыми в образцах мочи-1, но значительно (почти в 2 раза) возрастает размах колебаний содержаний, увеличивается групповая доля гидроксильных аминокислот и особенно резко возрастает содержание треонина среди незаменимых кислот.

Мочевые камни характеризуются относительно изотопно-тяжелым составом углерода, но изотопно-легким составом азота; моча-1 более изотопно-легкая по углероду, но более изотопно-тяжелая по азоту; моча-2 наиболее изотопно-легкая по углероду и изотопно-легкая на уровне мочевых камней по азоту. В целом исследованные объекты по изотопному составу весьма специфичны, отличаясь от органического вещества человеческих костей, ископаемых копролитов, земной атмосферы и углеродного вещества в осадочных горных породах. Но при этом они обнаруживают близость по изотопному составу углерода с абиогенными органическими полимерами в продуктах современного вулканизма. Представленные данные достаточно хорошо согласуются с современными представлениями о непрерывном процессе обмена веществом практически всех геосфер Земли (Кокин, 2024).

Результаты междисциплинарного исследования показывают следующее. Если в условиях земной коры источником энергии образования минеральных видов выступают физико-химические процессы в её геологической истории, то в организме человека биоэнергетический и биохимический потенциал выполняет ту

же работу, но по синтезу металлоорганических соединений и других минералоидов. В условиях, близких к равновесному состоянию, в организме человека и земной коре не происходит существенных сдвигов, вызывающих минералообразование. В неравновесных термодинамических условиях земной коры под влиянием обменных эндогенных физико-химических и геологических процессов формируется все многообразие пород, руд и минералов. Подобное состояние наблюдается и в организме человека, но при нарушениях обменных биохимических процессов под влиянием особенностей питания, различных заболеваний, колебаний pH и Eh среды, жизнедеятельности бактерий, изменений в окружающей среде. В организме человека происходит сброс органоминеральных образований из водно-солевого раствора по всей разветвлённой сети сосудов и каналов, что приводит к возникновению мочекаменной и желчнокаменной болезней, отложению солей в кровеносных сосудах. То есть практически в организме человека возникают условия для минералообразования, имеющего принципиальное подобие с минералообразованием в геологических условиях (коэволюция минерального и биологического миров по Н. П. Юшкину). Однако концентрации органогфильных элементов и соответствующих им биоминералов в организме человека могут многократно превышать таковые в геологических условиях. То есть потенциал живого для экстракции ряда химических элементов из водных растворов при образовании конкрементов может оказаться более эффективным, чем рудообразование в геологических условиях.

Все это лишний раз подтверждает известные положения о том, что «природа транслирует подобие своей организации на любом уровне вещества в рамках её фундаментальных законов» (Кокин, Кокин, 2022). Следовательно, продемонстрированные нами междисциплинарные исследования могут быть полезными не только для минералогов, биологов и медиков, но и для геологов в части изучения осадочных рудных месторождений, образовавшихся при участии живого вещества.

Исследования выполнены в рамках бюджетной темы 122040600009-2 «Фундаментальные проблемы минералогии и минералообразования, минералы как индикаторы петро- и рудогенеза, минералогия рудных районов и месторождений Тимано-Североуральского региона и арктических территорий».

Литература / References

- Амосова О. Е., Машина Е. В., Шанина С. Н. Аминокислоты как биомаркеры фазового состава холелитов // Вестник геонаук. 2020. № 10. С. 22—29. DOI: 10.19110/geov.2020.10.3
- Amosova O. E., Mashina E. V., Shanina S. N. Amino Acids as Biomarkers of the Phase Composition of Choleliths. Vestnik of Geosciences. 2020;10:22-29. Russian.
- Амосова О. Е., Шанина С. Н., Каткова В. И. Многомерный статистический анализ аминокислотного состава урелитов // Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии: Материалы минералогического семинара с международным участием (Юшкинские чтения — 2018). Сыктывкар, 2018. С. 127—128.

- Amosova O. E., Shanina S. N., Katkova V. I. Multivariate Statistical Analysis of the Amino Acid Composition of Uroliths. *Modern Problems of Theoretical, Experimental, and Applied Mineralogy: Proceedings of the Mineralogical Seminar with International Participation (Yushkin Readings — 2018)*. Syktyvkar; 2018. p. 127–128. Russian.
- Анищенко Л. А., Шанина С. Н. Аминокислоты как возможные индикаторы условий накопления и консервации органического вещества // *Органическая минералогия: Материалы российского совещания*. Сыктывкар, 2009. С. 71–74.
- Anishchenko L. A., Shanina S. N. Amino Acids as Possible Indicators of Organic Matter Accumulation and Conservation Conditions. *Organic Mineralogy: Proceedings of the Russian Meeting*. Syktyvkar; 2009. p. 71–74. Russian.
- Анищенко Л. А., Шанина С. Н. Аминокислоты в недрах: результаты исследования и перспективы изучения // *Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН*. 2010. № 9. С. 34–35.
- Anishchenko L. A., Shanina S. N. Amino Acids in the Subsoil: Research Results and Prospects. *Vestnik of IG Komi SC UB RAS*. 2010;9:34–35. Russian.
- Архипенко Д. К., Бокий Г. Б., Пальчик Н. А., Корнева Т. А. Модель термического разрушения структуры ярозита по данным ИК-спектроскопии и рентгенографии // *Известия АН СССР. Неорганические материалы*. 1982. № 1. С. 126–129.
- Arkhipenko D. K., Bokiya G. B., Palchik N. A., Korneva T. A. Model of Thermal Destruction of the Jarosite Structure Based on IR Spectroscopy and X-ray Diffraction Data. *Proc. of the USSR AS. Inorganic Materials*; 1982;1:126–129. Russian.
- Бельская Л. В., Голованова О. А. Особенности аминокислотного состава зубных и слюнных камней // *Минералогия и жизнь — происхождение биосферы и коэволюция минерального и биологического миров, биология: Материалы IV Международного минералогического семинара*. Сыктывкар, 2007. С. 81–82.
- Belskaya L. V., Golovanova O. A. Features of the Amino Acid Composition of Dental and Salivary Stones. *Mineralogy and Life — the Origin of the Biosphere and the Coevolution of the Mineral and Biological Worlds, Biology: Proceedings of the IV International Mineralogical Seminar*. Syktyvkar; 2007. p. 81–82. Russian.
- Боровкова Е. В. Морфологические типы желчных камней // *Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН*. 2004. № 8. С. 13–14.
- Borovkova E. V. Morphological types of gallstones. *Vestnik of the Institute of Geology Komi SC UB RAS*. 2004;8:13–14. Russian.
- Боровкова Е. В., Филиппов В. Н. Микровключения в пигментном холелите // *Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН*. 2009. № 8. С. 9–11.
- Borovkova E. V., Filippov V. N. Microinclusions in pigmented cholelith. *Vestnik of the Institute of Geology Komi SC UB RAS*. 2009;8:9–11. Russian.
- Бородулин В. Б., Глыбочко П. В., Дудакова Ю. С. Гипотеза биохимических механизмов образования почечных камней // *Урология*. 2009. № 3. С. 77–81.
- Borodulin V. B., Glybochko P. V., Dudakova Yu. S. Hypothesis of biochemical mechanisms of kidney stone formation. *Urology*. 2009;3:P. 77–81. Russian.
- Брик А. Б., Радчук В. В., Клименко А. П., Калиниченко А. М., Багмут Н. Н. Исследования биоминералов, локализованных в организме человека, в связи с решением экологических и медицинских проблем // *Минералогия и жизнь: происхождение биосферы и коэволюция минерального и биологического миров: Материалы IV Международного семинара*. Сыктывкар: Геопринт, 2007. С. 159–160.
- Brik A. B., Radchuk V. V., Klimenko A. P., Kalinichenko A. M., Bagmut N. N. Studies of biominerals localized in the human body in connection with solving environmental and medical problems. *Mineralogy and Life: The Origin of the Biosphere and the Coevolution of the Mineral and Biological Worlds: Proceedings of the IV International Seminar*. Syktyvkar: Geoprint; 2007. pp. 159–160. Russian.
- Войткевич Г. В., Кокин А. В., Мирошников А. Е., Прохоров В. Г. Справочник по геохимии. М.: Недра, 1990. 480 с.
- Voitkevich, G. V., Kokin, A. V., Miroshnikov, A. E., Prokhorov, V. G. *Handbook of Geochemistry*. Moscow: Nedra; 1990. 480 p. Russian.
- Волков В. Т., Волкова Н. Н., Смирнов Г. В., Полиенко А. К., Ермолаев Е. А., Бакиров А. Г., Медведев М. А., Рихванов Л. П., Сухих Ю. И. Биоминерализация в организме человека и животных. Томск: Тандем-Арт, 2004. 498 с.
- Volkov V. T., Volkova N. N., Smirnov G. V., Polienko A. K., Ermolaev E. A., Bakirov A. G., Medvedev M. A., Rikhvanov L. P., Sukhikh Yu. I. *Biom mineralization in the Human and Animal Body*. Tomsk: Tandem-Art; 2004. 498 p. Russian.
- Иванов К. С., Биглов К. Ш., Ерохин Ю. В. Микроэлементный состав нефтей Республики Татарстан (на примере Ромашкинского месторождения) // *Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН*, 2013. № 6. С. 2–6.
- Ivanov K. S., Biglov K. Sh., Erokhin Yu. V. Microelement Composition of Oils from the Republic of Tatarstan (using the Romashkinskoye Field as an Example). *Vestnik of IG Komi SC UB RAS*. 2013;6:2–6. Russian.
- Изатулина А. Р., Голованова О. А., Пунин Ю. О., Штукенберг А. Г. Влияние аминокислот на формирование оксалатных почечных камней // *Минералогия и жизнь: происхождение биосферы и коэволюция минерального и биологического миров, биоминералогия: Материалы IV Международного семинара*. Сыктывкар: Геопринт, 2007. С. 175–176.
- Izatulina A. R., Golovanova O. A., Punin Yu. O., Shtukenberg A. G. Effect of amino acids on the formation of oxalate kidney stones. *Mineralogy and life: the origin of the biosphere and the coevolution of the mineral and biological worlds, biomineralogy: Proceedings of the IV International seminar*. Syktyvkar: Geoprint; 2007. p. 175–176. Russian.
- Изатулина А. Р., Гуржий В. В., Кржижановская М. Г., Франк-Каменецкая О. В. Кристаллохимия органических минералов мочевой системы человека // *Органическая минералогия: Материалы V Всероссийского совещания с международным участием, Пушкино, 2014*. С. 42–43.
- Izatulina A. R., Gurzhii V. V., Krzhizhanovskaya M. G., Frank-Kamenetskaya O. V. Crystal chemistry of organic minerals of the human urinary system. *Organic mineralogy: Proceedings of the V All-Russian conference with international participation, Pushchino*; 2014. p. 42–43. Russian.



- Каткова В. И.* Мочевые камни: минералогия и генезис. Сыктывкар: Изд-во Коми НЦ УрО РАН, 1996. 86 с.
Katkova V. I. Urinary stones: mineralogy and genesis. Syktyvkar: Publishing House of the Komi SC UB RAS; 1996. 86 p. Russian.
- Каткова В. И., Боровкова Е. В.* Пигментные холелиты // Минералогия и жизнь: происхождение биосферы и коэволюция минерального и биологического миров, биоминералогия: Материалы IV Международного семинара. Сыктывкар: Геопринт, 2007. С. 178—179.
Katkova V. I., Borovkova E. V. Pigment choleliths. Mineralogy and Life: The Origin of the Biosphere and Coevolution of the Mineral and Biological Worlds, Biomineralogy: Proceedings of the IV International Seminar. Syktyvkar: Geoprint; 2007. pp. 178—179. Russian.
- Каткова В. И., Симаков А. Ф.* Аминокислотный состав биоминеральных образований в зависимости от их строения // Теоретическая минералогия и техническая кристаллография: Материалы 2-го Уральского кристаллографического совещания. Сыктывкар, 1998. С. 95.
Katkova V. I., Simakov A. F. Amino Acid Composition of Biomineral Formations Depending on Their Structure. Theoretical Mineralogy and Technical Crystallography: Proceedings of the 2nd Ural Crystallographic Meeting. Syktyvkar; 1998. p. 95. Russian.
- Каткова В. И., Шанина С. Н.* Хиральные соединения в уrolитах // Вестник геонаук, 2019. № 4. С. 38—41.
Katkova V. I., Shanina S. N. Chiral Compounds in Uroliths. Vestnik of Geosciences. 2019;4:38—41. Russian.
- Каткова В. М., Шанина С. Н.* D-аминокислоты в составе биоапатита // Органическая минералогия: Материалы V Российского совещания с международным участием. Пушчино, 2019. С. 45—46.
Katkova V. M., Shanina S. N. D-Amino Acids in Bioapatite. Organic Mineralogy: Proceedings of the V Russian Conference with International Participation. Pushchino; 2019. p. 45—46. Russian.
- Козловский Ю. Г.* О минералогической классификации мочевых камней // Урология и нефрология. 1973. № 2. С. 24—26.
Kozlovsky Yu. G. On the Mineralogical Classification of Urinary Stones. Urology and Nephrology. 1973;2:24—26. Russian.
- Кокин А. В.* К проблеме формирования вещества геосфер Земли в её геологической истории // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. 2024. № 4 (99). С. 4—12. DOI: 10.33580/2541-9684-2024-99-4-4-12
Kokin A. V. On the Problem of Formation of the Earth's Geosphere Matter in Its Geological History. Proceedings of the Institute of Geology, Dagestan Scientific Center, Russian Academy of Sciences. 2024;4(99):4—12. Russian.
- Кокин А. В., Кокин А. А.* Золотое сечение и эволюция (введение в общую теорию нелокальной эволюции). М.: Информ-право. 2022. 232 с.
Kokin A. V., Kokin A. A. The Golden Section and Evolution (Introduction to the General Theory of Non-local Evolution). Moscow: Inform-Pravo; 2022. 232 p. Russian.
- Кокин А. В., Силаев В. И., Павлович Н. В., Киселева Д. В., Слюсарь А. В., Слюсарь А. А.* О возможной связи мочекаменной болезни с деятельностью бактерий в организме человека // Наука юга России, 2020. Т. 16. № 1. С. 77—87. DOI: 10.7868/S25000640200110
Kokin A. V., Silaev V. I., Pavlovich N. V., Kiseleva D. V., Slyusar A. V., Slyusar A. A. On the Possible Connection Between Urolithiasis and Bacterial Activity in the Human Body. Science of the South of Russia. 2020;16(1):77—87. Russian.
- Колониченко Е. В.* Живое и косное вещество: Сравнительный анализ элементов в составе человека // Минералогия и жизнь: происхождение биосферы и коэволюция минерального и биологического миров, биоминералогия: Материалы IV Международного семинара. Сыктывкар: Геопринт, 2007. С. 103—105.
Kolonichenko E. V. Living and Inert Matter, Comparative Analysis of Elements in Human Composition. Mineralogy and Life: The Origin of the Biosphere and Coevolution of the Mineral and Biological Worlds, Biomineralogy: Proceedings of the 4th International Seminar. Syktyvkar: Geoprint; 2007. p. 103—105. Russian.
- Кораго А. А.* Введение в биоминералогия. СПб.: Недра, 1992. 280 с.
Korago A. A. Introduction to Biomineralogy. St. Petersburg: Nedra; 1992. 280 p. Russian.
- Котельникова Е. Н.* Дискретные соединения и пределы твердых растворов в бинарных системах аминокислот // Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения — 2018): Материалы минералогического семинара с международным участием. Сыктывкар: Геопринт, 2018. С. 74.
Kotelnikova E. N. Discrete Compounds and Limits of Solid Solutions in Binary Amino Acid Systems. Modern Problems of Theoretical, Experimental, and Applied Mineralogy (Yushkin Readings — 2018): Proceedings of the Mineralogical Seminar with International Participation. Syktyvkar: GeoPrint; 2018. p. 74. Russian.
- Ламанова Л. М.* Кристаллические отложения в атеросклеротических бляшках как полиминеральные объекты // Минералогия и жизнь: происхождение биосферы и коэволюция минерального и биологического миров, биоминералогия: Материалы IV Международного семинара. Сыктывкар: Геопринт, 2007. С. 108—110.
Lamanova L. M. Crystalline deposits in atherosclerotic plaques as polymineral objects. Mineralogy and life: the origin of the biosphere and the coevolution of the mineral and biological worlds, biomineralogy: Proceedings of the IV International Seminar. Syktyvkar: Geoprint; 2007. p. 108—110. Russian.
- Лебедев Д. Г., Смирнова В. И., Лапин С. В., Бурлака О. О., Розенгауз Е. В., Эмануэль В. Л.* Анализ мочевых конкрементов в изучении особенностей патогенеза мочекаменной болезни // Вестник урологии. 2021. Т. 9. № 3. С. 44—51. <https://doi.org/10.21886/2308-6424-2021-9-3-44-51>
Lebedev D. G., Smirnova V. I., Lapin S. V., Burlaka O. O., Rosenhaus E. V., Emanuzl V. L. Analysis of urinary calculi in the study of the pathogenesis of urolithiasis. Bulletin of Urology. 2021;9(3):44—51. Russian.
- Мак-Коннелл Д.* Биоминералогия фосфатов и физиологическая минерализация // Фосфор в окружающей среде. М.: Мир, 1977. С. 462—481.
McConnell D. Phosphate biomineralogy and physiolog-



- ical mineralization. Phosphorus in the environment. Moscow: Mir; 1977. p. 462–481. Russian.
- Машина Е. В. Карбонаты и фосфаты в холелитах // Структура, вещество, история литосферы Тимано-Североуральского региона: Материалы 21-й научной конференции ИГ Коми НЦ УрО РАН. Сыктывкар: Геопринт, 2017. С. 151–152.
- Mashina E. V. Carbonates and phosphates in choleliths. Structure, substance, and history of the lithosphere of the Timan-Northern Ural region: Proceedings of the 21st scientific conference of the IG Komi SC UB RAS. Syktyvkar: Geoprint; 2017. p. 151–152. Russian.
- Машина Е. В., Шанина С. Н. Исследование энантиомеров в патогенных биоминеральных образованиях // Российский химический журнал. 2022. Т. 66. № 4. С. 14–18. DOI: 10.6060/rcj.2022664.2
- Mashina E. V., Shanina S. N. Study of enantiomers in pathogenic biomineral formations. Russian Chemical Journal. 2022;66(4):14–18. Russian.
- Миронова Г. А. Конденсированное состояние вещества: от структурных единиц до живой материи. Т. 2. М.: Физический факультет МГУ, 2006. 840 с.
- Mironova, G. A. Condensed state of matter: from structural units to living matter. Vol. 2. Moscow: Physics Faculty, Moscow State University; 2006. 840 p. Russian.
- Нигматулина Е. Н., Сокол Э. В., Чиглинцев А. Ю., Лукьянов Я. Л. Главные минералогические типы почечных камней // Химия в интересах устойчивого развития. 2004. № 12. С. 61–81.
- Nigmatulina E. N., Sokol E. V., Chiglintsev A. Yu., Lukanov Ya. L. Main mineralogical types of kidney stones. Chemistry for Sustainable Development. 2004;12:61–81. Russian.
- Павлович Н. В., Кокин А. В., Силаев В. И., Ронова Н. В., Цимбалистова М. В., Киселева Д. В., Слюсарь А. В. Сравнительный анализ состава микроэлементов у бактерий различных видов // Актуальные вопросы изучения особо опасных и природно-очаговых болезней. Ростов-на-Дону, 2019. С. 309–313.
- Pavlovich N. V., Kokin A. V., Silaev V. I., Ronova N. V., Tsymbalistova M. V., Kiseleva D. V., Slyusar A. V. Comparative analysis of the composition of trace elements in bacteria of different species. Current issues in the study of especially dangerous and natural focal diseases. Rostov-on-Don; 2019. p. 309–313. Russian.
- Полиенко А. К., Ермолаев В. А., Жуков Ю. Н. Морфология и генезис почечных камней // Материалы к топоминералогии Урала. Свердловск: УНЦ РАН, 1996. С. 107–111.
- Polienko A. K., Ermolaev V. A., Zhukov Yu. N. Morphology and genesis of kidney stones. Materials on the topomineralogy of the Urals. Sverdlovsk: Ufa Scientific Center of the Russian Academy of Sciences; 1996. p. 107–111. Russian.
- Полиенко А. Л., Севостьянова О. А. Генезис уролитов // Известия Томского политехнического университета. 2003. Т. 306. № 4. С. 50–55.
- Polienko A. L., Sevostyanova O. A. Genesis of uroliths. Bulletin of Tomsk Polytechnic University. 2003;306(4):50–55. Russian.
- Полиенко А. К., Севостьянова О. А. Развитие научных исследований по биоминералогии и урологии в Томском политехническом университете // Известия Томского политехнического университета. 2012. Т. 320. С. 206–211.
- Polienko A. K., Sevostyanova O. A. Development of scientific research in biomineralogy and urology at Tomsk Polytechnic University. Bulletin of Tomsk Polytechnic University. 2012;320:206–211. Russian.
- Полиенко А. Л., Севостьянова О. А., Орлов А. А. Симбиоз живого и косного вещества в уролитах // Известия Томского политехнического университета. 2010. Т. 317. № 1. С. 10–15.
- Polienko A. L., Sevostyanova O. A., Orlov A. A. Symbiosis of Living and Inert Matter in Uroliths. Bulletin of Tomsk Polytechnic University. 2010;317(1):10–15. Russian.
- Полиенко А. Л., Шубин Г. В., Ермолаев В. А. Онтогенез уролитов. Томск: РИО Пресс-интеграл ЦПК ЖК, 1997. 128 с.
- Polienko A. L., Shubin G. V., Ermolaev V. A. Ontogeny of Uroliths. Tomsk; Press-integral; 1997. 128 p. Russian.
- Ракин В. И., Каткова В. И., Makeev Б. А. Особенности трансформации оксалатов кальция в уролитах // Теория, история, философия и практика минералогии: Материалы 4-го международного минералогического семинара. Сыктывкар: Геопринт, 2006. С. 75–76.
- Rakin V. I., Katkova V. I., Makeev B. A. Features of Calcium Oxalate Transformation in Uroliths. Theory, History, Philosophy, and Practice of Mineralogy: Proceedings of the 4th International Mineralogical Seminar. Syktyvkar: Geoprint; 2006. p. 75–76. Russian.
- Севостьянова О. А., Полиенко А. К. Минеральный состав уролитов // Известия Томского политехнического университета. 2004. Т. 307. № 2. С. 62–62.
- Sevostyanova O. A., Polienko A. K. Mineral composition of uroliths. Bulletin of Tomsk Polytechnic University. 2004;307(2):62–62. Russian.
- Силаев В. И., Аникин Л. П., Шанина С. Н., Карпов Г. А., Васильев Е. А., Шуйский А. С., Смолева И. В., Киселева Д. В., Мартиросян О. В., Вергасова Л. П. Абиогенные конденсированные органические полимеры в продуктах современного магматизма в связи с проблемой возникновения жизни на Земле. Сыктывкар: Геопринт, 2018. 128 с.
- Silaev V. I., Anikin L. P., Shanina S. N., Karpov G. A., Vasiliev E. A., Shuysky A. S., Smoleva I. V., Kiseleva D. V., Martirosyan O. V., Vergasova L. P. Abiogenic condensed organic polymers in the products of modern magmatism in connection with the problem of the origin of life on Earth. Syktyvkar: Geoprint; 2018. 128 p. Russian.
- Силаев В. И., Белицкая А. А., Туркина Т. Ю., Смолева И. В., Хазов А. Ф., Киселева Д. В. Окружающая среда и диета населения раннего средневековья Европейского Северо-Востока (по данным изотопно-геохимического анализа антропологических материалов из могильников V–VII вв. н. э.) // Известия Коми НЦ УрО РАН. 2019. № 3. С. 53–64.
- Silaev V. I., Belitskaya A. A., Turkina T. Yu., Smoleva I. V., Khazov A. F., Kiseleva D. V. Environment and diet of the early medieval population of the European North-East (based on isotope-geochemical analysis of anthropological materials from burial grounds of the 5th-7th centuries AD). Proceedings of the Komi SC UB RAS. 2019;3:53–64. Russian.
- Силаев В. И., Кокин А. В., Павлович Н. В., Шанина С. Н., Киселева Д. В., Васильев Е. А., Мартиросян О. В.,



- Смолева И. В., Филиппов В. Н., Хазов А. Ф., Шуйский А. С., Щемелинина Т. Н., Игнатиев Г. В., Слюсарь А. В. Первые результаты комплексных исследований современных микроорганизмов физико-химическими и минералого-геохимическими методами // Вестник геонаук. 2021. № 9. С. 3–35. DOI: 10.19110/geov.2021.9.1
- Silaev V. I., Kokin A. V., Pavlovich N. V., Shanina S. N., Kiseleva D. V., Vasilyev E. A., Martirosyan O. V., Smoleva I. V., Filippov V. N., Khazov A. F., Shuisky A. S., Shchemelinina T. N., Ignatiev G. V., Slyusar A. V. First results of complex studies modern microorganisms using physicochemical and mineralogical-geochemical methods. Vestnik of Geosciences. 2021;9:3–35. Russian.
- Силаев В. И., Кокин А. В., Слюсарь А. В., Попов Ю. В. Микростроение и минералого-геохимические свойства типичных конкрементов человека // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. 2017. № 8. С. 23–35.
- Silaev V. I., Kokin A. V., Slyusar A. V., Popov Yu. V. Microstructure and mineralogical and geochemical properties of typical human stones. Vestnik of the Institute of Geology Komi SC UB RAS. 2017;8:23-35. Russian.
- Силаев В. И., Пономарев Д. В., Симакова Ю. С., Шанина С. Н., Смолева И. В., Тропников Е. М., Хазов А. Ф. Современные исследования ископаемого костного детрита: палеонтология, минералогия, геохимия // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН, 2016. № 5. С. 19–31.
- Silaev V. I., Ponomarev D. V., Simakova Yu. S., Shanina S. N., Smoleva I. V., Tropnikov E. M., Khazov A. F. Modern studies of fossil bone detritus: paleontology, mineralogy, geochemistry. Vestnik of the Institute of Geology Komi SC UB RAS. 2016;5:19–31. Russian.
- Силаев В. И., Смолева И. В., Антошкина А. И., Чайковский И. И. Опыт сопряженного анализа изотопного состава углерода и азота в углеродистых веществах разного происхождения // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении: Материалы Научных чтений памяти П. Н. Чирвинского. Вып. 15. Пермь, 2012. С. 342–366. Russian.
- Silaev V. I., Smoleva I. V., Antoshkina A. I., Tchaikovskiy I. I. Experience of coupled analysis of the isotopic composition of carbon and nitrogen in carbonaceous substances of different types of origin. Problems of mineralogy, petrography and metallogeny: Proceedings of the Scientific Readings in memory of P. N. Chirvinsky. Issue 15, Perm; 2012. p. 342–366. Russian.
- Силаев В. И., Юшкин Н. П., Жарков В. А., Киселева Д. В., Лютюев В. П., Симакова Ю. С., Филиппов В. П. Ископаемые копролиты мезокайнозойских животных как источник минералого-геохимической, палеонтологической и палеоэкологической информации // Литосфера. 2019. Т 19. № 3. С. 393–415.
- Silaev V. I., Yushkin N. P., Zharkov V. A., Kiseleva D. V., Lyutoev V. P., Simakova Yu. S., Filippov V. P. Fossil coprolites of Mesozoic-Cenozoic animals as a source of mineralogical, geochemical, paleontological and paleoecological information. Lithosphere. 2019;19(3):393–415. Russian.
- Солонин Ю. Г. Минералы в организме человека // Топоминералогические аспекты медицинской минералогии: Материалы 12 региональной минералогической школы. Сыктывкар, 1991. С. 8–10.
- Solonin Yu. G. Minerals in the human body. Topo-mineralogical aspects of medical mineralogy: Proceedings of the 12th regional mineralogical school. Syktyvkar; 1991. p. 8–10. Russian.
- Сребродольский Б. М. Биологическая минералогия. Киев: Наукова Думка, 1983. 102 с.
- Srebrodol'skii B. M. Biological Mineralogy. Kyiv: Naukova Dumka; 1983. 102 p. Russian.
- Шанина С. Н., Бушнев Д. А., Бурдельная Н. С. Аминокислоты доманиковых сланцев // Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии: Материалы минералогического семинара с международным участием (Юшкинские чтения – 2018). Сыктывкар: Геопринт, 2016. С. 176–177.
- Shanina S. N., Bushnev D. A., Burdel'naya N. S. Amino Acids of Domanik Shales. Modern Problems of Theoretical, Experimental, and Applied Mineralogy: Proceedings of the Mineralogical Seminar with International Participation (Yushkin Readings – 2018). Syktyvkar: Geoprint; 2016. p. 176–177. Russian.
- Шанина С. Н., Голубев Е. А., Амосова О. Е. Изменение аминокислотного состава природных углеродистых веществ и некоторых синтетических аналогов в ряду карбонизации // Вестник геонаук. 2022. № 8. С. 25–37.
- Shanina S. N., Golubev E. A., Amosova O. E. Changes in the Amino Acid Composition of Natural Carbonaceous Substances and Some Synthetic Analogues in the Carbonation Series. Vestnik of Geosciences. 2022;8:25–37. Russian.
- Юшкин Н. П. Биоминеральные взаимодействия: 42-е Чтения им. В. И. Вернадского. М.: Наука, 2002. 60 с.
- Yushkin N. P. Biomineral Interactions: 42nd Vernadsky Readings. Moscow: Nauka; 2002. 60 p. Russian.
- Юшкин Н. П. Минеральный мир и биосфера: минеральный организобиоз, биоминеральные взаимодействия, коэволюция // Минералогия и жизнь: происхождение биосферы и коэволюция минерального и биологического миров. Биоминералогия: Материалы IV Международного семинара. Сыктывкар: Геопринт, 2007. С. 5–8.
- Yushkin N. P. Mineral World and Biosphere: Mineral Organismobiosis, Biomineral Interactions, Coevolution. Mineralogy and Life: Origin of the Biosphere and Coevolution of the Mineral and Biological Worlds. Biomineralogy: Proceedings of the 4th International Seminar. Syktyvkar: Geoprint; 2007. p. 5–8. Russian.
- Юшкин Н. П. Радиосинтез белковых аминокислот в твердых битумах // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН, 1999. № 9. С. 2–3.
- Yushkin N. P. Radiosynthesis of Protein Amino Acids in Solid Bitumens. Vestnik of the Institute of Geology Komi SC UB RAS. 1999;9:2–3. Russian.
- Юшкин Н. П., Бушнев Д. А., Шанина С. Н. Ископаемые смолы Северной Евразии // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2006. № 11. С. 2–9.
- Yushkin N. P., Bushnev D. A., Shanina S. N. Fossil resins of northern Eurasia. Vestnik of Institute of geology Komi SC UB RAS. 2006;11:2-9. Russian.
- Юшкин Н. П., Силаев В. И., Жарков В. А., Филиппов В. Н., Лютюев В. П., Симакова Ю. С. Мезозойские копролиты: минералого-геохимические свойства и отношение к прогнозу фосфатности // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении: Научные чте-



- ния памяти П. Н. Чирвинского. Вып. 16. Пермь: Изд-во ПГУ, 2013. С. 26–52.
- Yushkin N. P., Silaev V. I., Zharkov V. A., Filippov V. N., Lyutoev V. P., Simakova Yu. S. Mesozoic coprolites: mineralogical and geochemical properties and relation to the forecast of phosphate content. Problems of mineralogy, petrography and metallogeny. Scientific readings in memory of P. N. Chirvinsky. Vol. 16. Perm: PSU Publishing House; 2013. p. 26–52. Russian.
- Fuch S. A., Berger R., Klomp L. W., Koning T. J. D-amino acids in the central nervous system in health and disease. Molecular Genetics and Metabolism. 2005;85(3):168–180.
- Huskic I., Pecov I. V., Krivovichev S. V., Friscic T. Minerals with metal-organic framework structure. Science Advances, 2016. Aug 5: 2(8); e1600621.
- Hassan Q., Jaleel A., Bashir Z., Jajja N., Tarar U. M., Haider S., Zehra L. Amino acid racemization in human dentine as an estimator of chronological age. Pakistan Journal of Medicine and Dentistry. 2014;3:3–11.
- Kimura T., Hamase K., Miyoshi Y., Yamamoto R., Yasuda K., Mita M., Rakugi H., Hayashi T., Isaka Y. Chiral amino acid metabolomics for novel biomarker screening in the prognosis of chronic kidney disease. Scientific Reports. 2016;6(1):26–37.

Поступила в редакцию / Received 29.01.2026



Интегральная оценка геоэкологического риска загрязнения почвенного покрова в зоне воздействия Айхальского горно-обогатительного комбината (Якутия)

А. Г. Гололобова, Я. Б. Легостаева, О. В. Шадринова

Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск, Россия

nuta0687@mail.ru, ylego@mail.ru, ovshadrinova@mail.ru

Горнодобывающая промышленность является одним из основных источников негативного воздействия. При этом почва представляет собой главный геохимический поглотитель различных загрязняющих веществ в ландшафте. В настоящем исследовании с помощью эколого-геохимических и токсикологических индексов загрязнения, таких как индекс Немерова (*INI*), индекс нагрузки загрязнения (*PLI*), индекс суммарного загрязнения (Z_c), индекс потенциального экологического риска (*RI*), выявлены уровни химического загрязнения почв территории промышленной площадки Айхальского горно-обогатительного комбината потенциально токсичными элементами (Pb, Ni, Mn, Cd, Co, Cr, Zn, Cu, As). В результате расчетов интегральных индексов выявлены элементы, играющие основную роль в загрязнении исследуемых почв. Элементами-загрязнителями по *INI* являются As, Ni и Cu; по *PLI* – As, Ni, Cu, Zn, Cr, Co, Mn; по Z_c – As, Ni, Cu, Zn, Cr; по *RI* – Ni. Главный фактор экологического риска для почв в районе промышленной площадки Айхальского ГОКа связан с повышенным содержанием никеля. С помощью карт пространственного распределения выявлены локальные площадки с высокой геоэкологической напряженностью, приуроченные к территориям обогатительных фабрик.

Ключевые слова: потенциально токсичные элементы, загрязнение почв, индексы загрязнения, геоэкологический риск, Далдыно-Алаakitский алмазоносный район, Алаakit-Мархинское кимберлитовое поле

Integrated assessment of geoecological risk of soil contamination in the impact zone of the Aikhal Mining and Processing Plant (Yakutia, Russia)

A. G. Gololobova, Ya. B. Legostaeva, O. V. Shadrinova

Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, Yakutsk

In recent years, soil pollution with potentially toxic elements has become an important issue causing widespread concern because it is a significant factor threatening the environment. The mining industry is one of the main sources of negative impact. Moreover, the soil is the main geochemical absorber of various pollutants. In the present study, using ecological-geochemical and toxicological pollution indices, such as the Nemerov index (*INI*), pollution load index (*PLI*), total pollution index (Z_c), potential ecological risk index (*RI*), the levels of chemical pollution of soils of the industrial site of the Aikhal Mining and Processing Division with potentially toxic elements (Pb, Ni, Mn, Cd, Co, Cr, Zn, Cu, As) are identified. As a result of calculations of these indices, the elements that make the main contribution to the pollution of the studied soils are identified. The pollutant elements for *INI* are As, Ni and Cu; for *PLI* – As, Ni, Cu, Zn, Cr, Co, Mn; for Z_c – As, Ni, Cu, Zn, Cr; for *RI* – Ni. Nickel is the main environmental risk factor for soils at the Aikhal Mining and Processing Division's industrial site. Using spatial distribution maps, localized areas with high geoecological stress are identified near the processing plants.

Keywords: potentially toxic elements, soil pollution, pollution indices, geoecological risk, Daldyn-Alakit diamond-bearing region, Alakit-Markhinsky kimberlite field

Введение

Горнодобывающая промышленность является одной из важнейших отраслей российской экономики. В числе регионов, занимающих ведущие позиции в добыче полезных ископаемых, выделяется Республика Саха (Якутия), где по состоянию на 2021 г. насчитывалось 2116 месторождений полезных ископаемых (Госдоклад, 2022), а в 2024 г. учитывается 3000 место-

рождений ОПИ по 59 видам минерального и углеводородного сырья (Госдоклад, 2025). В связи с этим в Якутии наблюдается тенденция увеличения площади нарушенных ландшафтов с высоким уровнем загрязнения почвенного покрова и уничтожением плодородного слоя земли за счет аккумуляции токсичных веществ, в том числе и потенциально токсичных элементов.

Для цитирования: Гололобова А. Г., Легостаева Я. Б., Шадринова О. В. Интегральная оценка геоэкологического риска загрязнения почвенного покрова в зоне воздействия Айхальского горно-обогатительного комбината (Якутия) // Вестник геонаук. 2026. 2(374). С. 47–59. DOI: 10.19110/geov.2026.2.4

For citation: A. G. Gololobova, Ya. B. Legostaeva, O. V. Shadrinova Integrated assessment of the geoecological risk of soil contamination in the impact zone of the Aikhal Mining and Processing Plant (Yakutia, Russia). Vestnik of Geosciences, 2025, 2(374), pp. 47–59. DOI: 10.19110/geov.2026.2.4

Потенциально токсичные элементы (ПТЭ) — это металлы, металлоиды и неметаллы, которые относятся к группам наиболее опасных загрязнителей окружающей среды из-за их опасности и токсичности, оказывающих необратимые последствия на состояние компонентов природной среды даже в низких концентрациях. Они встречаются в природе и имеют плотность более 5 г/см^3 и атомные номера более 20 (Siegel, 2002). В последние годы вырос интерес к потенциально токсичным элементам из-за быстрого развития горнодобывающей промышленности, которая является основным источником поступления ПТЭ в окружающую среду в больших концентрациях, представляя значительную угрозу экосистеме в целом (Khadidja et al., 2021).

Добыча алмазов по сравнению с добычей цветных металлов считается «чистым» видом недропользования, так как в процессе не используются агрессивные химические реагенты вроде цианидов или кислот. Тем не менее при открытом способе добычи алмазов происходит сильное нарушение земной поверхности, огромные площади заняты карьерами кимберлитовых трубок, отвалами пустых пород, отходами первичного обогащения руд — хвостохранилищами и другими источниками техногенных выбросов и аэрорассева, при которых различные вещества, в том числе потенциально токсичные элементы, оседая на поверхность почвы, трансформируют ее элементный состав.

Поэтому с точки зрения геохимии рудоконтролирующие кимберлиты породы, складываемые в отвалы, представляют собой смесь мантийного вещества, корового загрязнения и продуктов вторичных изменений (Афанасьев и др., 2001), химическая специфичность которых начинает определять поведение всего техногенного массива. Кимберлитовая пульпа, накапливающаяся после обогащения в хвостохранилищах, имеет свойства ультраосновных пород, сформированных в условиях глубокой мантии (Костровицкий, 2009), и характеризуется аномально высокими (по сравнению с вмещающими осадочными породами) концентрациями элементов, входящих в состав породообразующих минералов (оливина, пироксенов, гранатов). Кроме этого, проявляются повышенные концентрации редких элементов (Sr, Ba, Ti) и металлоидов, например As (Легостаева и др., 2021).

Породы, извлеченные на поверхность и складываемые в отвалы, измельченный до состояния песка и пыли кимберлит в хвостохранилищах крайне неустойчивы при контакте с водой и кислородом воздуха. Запускаемые в результате процессы механохимической активации вызывают трансформацию первичных минералов: например, оливин замещается серпентином и сапонитом. Разрушение исходных кристаллических решеток первичных минералов способствует высвобождению элементов-примесей (Ni, Cr, Co) и их переходу в миграционноспособные (подвижные) формы. (Макаров, 2010). Интенсификация таких процессов провоцирует загрязнение сопредельных сред широким перечнем элементов, включая ПТЭ, среди которых почва выступает основным депонирующим звеном.

Распределение и аккумуляция потенциально токсичных элементов усугубляется особенностями природно-климатических условий самого региона. Якутия находится в зоне сплошного распространения и близкого залегания многолетнемерзлых пород. Мощность

мерзлотной толщи определяется в 250—400 м (Легостаева и др., 2021). Многолетняя мерзлота оказывает большое влияние на состояние надмерзлотной части почвенного профиля, формируя надмерзлотный геохимический барьер, где сорбируются различные формы загрязняющих веществ. Поэтому почвы северных экосистем являются самой уязвимой геосферой с точки зрения техногенного воздействия. Высокая сорбционная способность почвенного органического вещества и глинистого материала определяет низкую устойчивость всего почвенного комплекса к химическому загрязнению. Из-за сурового климата потенциал самовосстановления крайне низкий и механизмы естественной нейтрализации токсикантов здесь практически не работают, вследствие чего химическое загрязнение вызывает необратимую деградацию почвенного покрова (Гололобова, 2025).

Имеется довольно много исследований, посвященных изучению влияния ПТЭ на состояние почв в зонах воздействия различных промышленных предприятий (Сорокина и др., 2005; Белошейкина и др., 2021; Chen et al., 2024; Umeobi et al., 2025). При этом наблюдается дефицит исследований, посвященных закономерностям поведения ПТЭ в почвах Севера в условиях интенсивного техногенеза. В целом масштабное освоение природных ресурсов северных территорий неизбежно ведет к росту техногенной нагрузки, что делает анализ геоэкологических рисков для местных почв критически важным.

Настоящее исследование ставит целью изучение текущей геоэкологической ситуации на территории промышленной площадки Айхальского ГОКа посредством интегральной оценки загрязнения почвенного покрова, что необходимо для анализа масштабов экологического ущерба и эффективного снижения георисков.

Объекты и методы исследования

Территория исследования расположена на северо-западе Республики Саха (Якутия), в центральной части Якутской алмазоносной провинции, в пределах Далдыно-Алаakitского алмазоносного района, а именно Алаakit-Мархинского кимберлитового поля, где находится промышленная площадка Айхальского горно-обогатительного комбината (АГОК), недалеко от поселка городского типа Айхал ($65^{\circ}56'$ с. ш. и $111^{\circ}29'$ в. д.) (рис. 1). В настоящее время на территории промышленной площадки АГОК открыто и находится на разной стадии освоения 5 промышленно-алмазоносных кимберлитовых трубок: «Юбилейная», «Заря», «Айхал», «Сытыканская» и «Комсомольская». Последние две трубки являются отработанными, а месторождение Айхал с 1997 года переведено на подземный способ добычи (Шадринова, Легостаева, 2025).

АГОК находится в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород. Мощность мерзлых пород варьирует в пределах 800—1100 м, а в верховьях р. Мархи достигает 1500 м (Никифоров, Миронова, 2017). Климат резко континентальный с продолжительной зимой и коротким летом, среднегодовая температура равна -12.2°C , среднегодовые значения суммы выпадаемых осадков — 300,1 мм, сумма испаряемости — 346.1 мм, коэффициент увлажнения — 0.88 (Шадринова, Легостаева, 2025).

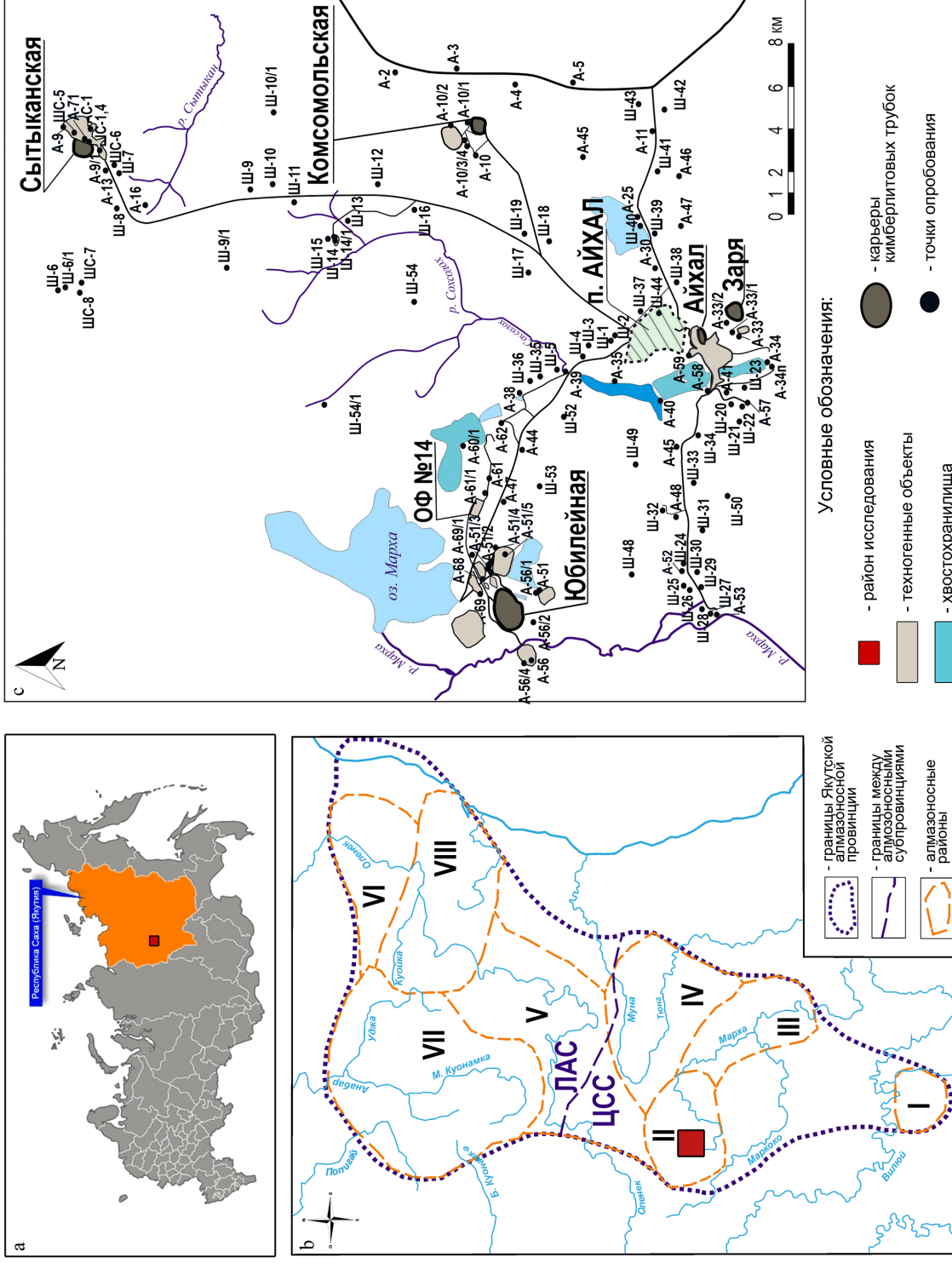


Рис. 1. Карта-схема территории исследования на карте России (а); схема размещения алмазонасных районов Якутской алмазонасной провинции (Россыпи..., 2005) (б): ЦСС — Центрально-Сибирская субпровинция, ЛАС — Лено-Анабарская субпровинция, алмазонасные районы: I — Малоботуобинский, II — Далдыно-Алакитский, III — Среднемархинский, IV — Мунно-Тунгский, V — Нижнеоленецкий, VII — Анабарский, VIII — Приленский; карта фактического опробования почв и грунтов на территории АТОК (с)

Fig. 1. Map of the study area on the map of Russia (a); the location of diamond-bearing regions of the Yakut diamond-bearing province (Rosсыпи..., 2005) (b): ЦСС — Central Siberian subprovince; diamond-bearing regions: I — Malobotuobinsky, II — Daldyno-Alakitsky, III — Sredneolenecky, IV — Muno-Tyungsky, V — Sredneolenecky, VII — Anabarsky, VIII — Prilensky; map of actual soil sampling on the territory of the Aikhal Mining and Processing Division (c)

В региональном тектоническом плане территория находится в пределах северо-восточной окраины Тунгусской синеклизы. Глубина залегания пород фундамента составляет от 2500 м на северо-востоке до 3100 м в его юго-западной части (Поспеева, Толстов, 2024). В геолого-стратиграфическом разрезе изучаемой толщи участка принимают участие палеозойские осадочные образования: карбонатно-терригенные отложения онхойюряхской свиты (кембрийская система); олдондинской, сохсоллоохской, сытыканской и кылахской свит (ордовикская система); байтахской и башенной (силурийская система); айхальской свиты (каменноугольная система). Осадочные породы перекрыты трапповым полем (мощностью 76–93 м) позднепалеозойского-раннемезозойского периода (P_2-T_1), образованным внедрением магмы основного состава — долеритами, слагающими крупные пластовые тела интрузий, и дайками, а также туфами (Янников и др., 2021).

В современном ландшафтном срезе почвы территории формируются на следующих отложениях: вершины и верхние части склонов водоразделов, сложенные траппами, сформированы преимущественно криоземами типичными (O-CR-C), криоземами глееватыми (O-CR_g-C_g) и литоземами серогумусовыми иллювиально-ожелезненными (AU-Cf-M). В средней и нижней частях склонов на породах нижнего силура и среднего ордовика располагаются карболитоземы Н-(С)-M_{Ca}. Техногенные отложения сформированы грунтами отвалов вскрыши и пустых пород рудоконтролирующих зон, а также отложениями хвостохранилищ и отстойников оборотного водоснабжения обогатительных фабрик (Шадринова, Легостаева, 2025).

Объектами исследований являются почвы и грунты промышленной площадки АГОКа. Опробование проводилось согласно ГОСТ 17.4.4.02-2017 методом ключевых участков в зоне влияния инфраструктуры промышленной площадки АГОКа. Исследования выполнялись по двум направлениям. Оценка геоэкологического состояния: для анализа почвенного покрова в природных биотопах и на техногенно-нарушенных участках отбор проб производился с глубин 0–10 и 10–20 см. Для обеспечения репрезентативности образцов на каждой площадке использовался «метод конверта». Диагностика и классификация: для изучения почв и почвоподобных образований закладывались полнопрофильные почвенные разрезы. Опробование выполнялось по всему профилю с отбором проб из каждого генетического горизонта или диагностируемого слоя. Местоположение точек опробования фиксировалось с помощью GPS-навигатора (Garmin, модель GPSMAP 64). Общий объем выборки составляет 243 почвенные пробы. Диагностика типов почв проведена в соответствии с Мировой реферативной базой почвенных ресурсов (Мировая..., 2024).

Химические анализы выполнялись по стандартным методикам с использованием стандартных образцов для почв — САДПП-07/2020 и САДПП-08/6тм ФГБНУ «ВНИИА агрохимии» с аттестованными значениями валового содержания микроэлементов. Почвы проанализированы на содержание валовых форм потенциально токсичных элементов (Pb, Ni, Mn, Cd, Co, Cr, Zn, Cu, As) атомно-эмиссионным спектральным полуколичественным анализом (АЭС), выполненном

на дифракционном спектрографе ДФС-8 с решеткой 600 штр/мм и однолинзовой системой освещения щели спектрографа согласно методике МП-7С в сертифицированной лаборатории ЦГЛ АО «Якутскгеология» (сертификат соответствия № СДС «УКАРГЕО» RU 0027.16 и № СДС «УКАРГЕО» RU 0027.21). Химический анализ каждого образца проводили в двух повторностях относительно контроля аналитической точности.

Как известно, индексы загрязнения применяются для перевода или интерпретации сложных химических данных о концентрации различных веществ в единый понятный показатель, который позволяет оценить качество окружающей среды и, конечно, различные геоэкологические и экологические риски. Индексы позволяют сопоставлять качество компонентов в разных городах, регионах или на различных участках мониторинга, используя единую шкалу и таким образом унифицируя данные.

В настоящем исследовании оценка загрязнения почвенного покрова проведена на основании расчетов геохимических коэффициентов — коэффициента концентрации (K_c), индекса загрязнения (PI), потенциального экологического фактора риска ПТЭ (E_r^I) и интегральных индексов — индекса Немерова (INI), индекса нагрузки загрязнения (PLI), суммарного показателя загрязнения почвенного покрова (Z_c), индекса потенциального экологического риска (RI).

Индекс Немерова (INI) применяется для оценки общих экологических рисков всех рассматриваемых ПТЭ, основанной на индексе геоаккумуляции (I_{geo}), который рассчитывается по следующим формулам:

$$INI = \sqrt{\frac{(I_{geo})^2_{max} + (I_{geo})^2_{avg}}{2}}, \quad (1)$$

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_n}{1,5 \times B_n} \right), \quad (2)$$

где C_n — измеренная концентрация микроэлементов в почве (ppm), B_n — геохимическое фоновое значение соответствующего микроэлемента (ppm) или его эталонное значение n . ($I_{geo})_{max}$ и ($I_{geo})_{avg}$ — максимальное и среднее значения I_{geo} для ПТЭ в точке мониторинга соответственно.

Коэффициент 1.5 используется для устранения возможных вариаций фоновых значений для данного микроэлемента в окружающей среде, а также небольших антропогенных воздействий (Adlane et al., 2020).

Индекс нагрузки загрязнения (PLI) показывает общую степень загрязнения, который позволяет легко доказать ухудшение состояния почвы в результате накопления ПТЭ и рассчитывается по следующим формулам:

$$PLI = (PI_1 \times PI_2 \times PI_3 \times \dots \times PI_n)^{1/n}, \quad (3)$$

$$PI = \frac{C_n}{B_n}, \quad (4)$$

где PI представляет собой коэффициент загрязнения ПТЭ i , C_n — измеренное значение ПТЭ в почве (ppm), B_n — геохимическое фоновое значение ПТЭ в местной почве (ppm), а n — количество ПТЭ (Abliz et al., 2022).

Индекс потенциального экологического риска (RI) применяется для оценки токсикологического воздействия ПТЭ. Формулы расчёта индекса RI следующие:



$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times P_i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times \frac{C_n}{B_n}, \quad (5)$$

$$E_r^i = T_r^i \times P_i, \quad (6)$$

где E_r^i — потенциальный экологический фактор риска ПТЭ i ; P_i — измеренное содержание элемента i (ppm), T_r^i — фактор токсической реакции отдельных ПТЭ i , имеющих следующие значения для исследованных ПТЭ: Pb = 5, Ni = 5, Mn = 1, Cd = 30, Co = 5, Cr = 2, Cu = 5, Zn = 1 и As = 10 (Wang et al., 2023).

Показатель суммарного загрязнения (Z_c) характеризует степень химического загрязнения почв и грунтов обследуемых территорий ПТЭ и является индикатором неблагоприятного воздействия на здоровье населения. Рассчитывается по следующим формулам:

$$Z_c = \sum_{i=1}^n K_c - (n - 1), \quad (7)$$

$$K_c = \frac{C_n}{B_n}, \quad (8)$$

где K_c представляет собой коэффициент загрязнения ПТЭ со значением $K_c > 1.5$, n — число аномальных элементов. Элементы с очень низким фоновым содержанием не использовались.

Значения регионального фона рассчитаны на основе статистически достоверной выборки ($n = 1241$), куда вошли образцы доминирующих и интразональных типов почв природных ненарушенных ландшафтов Северо-Западной Якутии. Таким образом, под термином «параметры регионального фона» мы понимаем средние геометрические значения содержания валовых форм микроэлементов в почвенном покрове по данным наших исследований и с привлечением результатов известных геохимических изысканий в регионе, сопоставимых по химико-аналитическим методам (Ягнышев и др., 2005).

Индекс потенциального риска (RI) отражает токсикологическую опасность одного или нескольких элементов и рассчитывается на основе индивидуального коэффициента токсичности элемента (E_r^i).

Геохимические данные обработаны с помощью пакета программ Statistica и OriginPro 2024. Элементы контурной карты были построены методом интерполяции кригинга с помощью Surfer 25.

Результаты и обсуждение

Для оценки степени антропогенного воздействия на почвенный покров использован анализ коэффициентов вариации ПТЭ (табл. 1). Высокие значения коэффициента вариации (CV) интерпретируются как признак техногенного загрязнения, в то время как низкие указывают на естественное происхождение элементов. Опираясь на пороговые значения, предложенные в работе Abliz et al. (2022), мы распределили элементы по степени их пространственной дисперсии. Наибольшая изменчивость, указывающая на локальные источники загрязнения, характерна для цинка (Zn). Полный ранжированный ряд ПТЭ по мере снижения их изменчивости выстраивается в следующей последовательности: Zn > Ni > Cr > As > Cu > Pb > Mn > Co > Cd.

Разброс значений коэффициента вариации позволяет выявить дифференциацию уровней поступления ПТЭ в почву, что указывает на неоднородное распределение техногенной нагрузки на почву внутри промплощадки. Анализ средних концентраций позволяет выстроить иерархию накопления ПТЭ. Ряд убывания выглядит следующим образом: Cr > Zn > Ni > Mn > Cu > Co > As > Pb > Cd. Несмотря на лидерство хрома в общем валовом содержании, по степени антропогенного влияния на первое место выходит никель. Для оценки экологического состояния площадки использовались два ключевых направления анализа ситуации: вариации коэффициентов концентрации и распространность загрязнения.

В почвах промышленной площадки Айхальского ГОКа зафиксирована специфическая структура загрязнения. Наибольшее отклонение от фоновых уровней отмечено для Ni (в 3.3 раза), Cu (2.1) и Zn (1.9). Хром и кобальт демонстрируют менее выраженное превышение K_c (1.5 и 1.2 соответственно). Наиболее часто (более чем в 60 % проб) превышение фона наблюдается у меди, цинка и никеля. Свинец (27 %) и хром (35 %) имеют более локальный характер распределения.

По значениям коэффициента концентрации микроэлементы условно можно разделить на три группы (Янин, 2004):

- микроэлементы, концентрация которых превышает фоновый уровень более чем в 1,5 раза ($K_c > 1.5$);
- микроэлементы с концентрацией, близкой к фоновым (K_c от 0,70 до 1,5);
- микроэлементы с концентрацией ниже фоновых ($K_c \leq 0.70$).

Значительное превышение ($K_c > 1.5$) чаще всего встречается у меди (54 %) и никеля (47 %). Также существенная доля проб с превышением отмечена для мышьяка (44 %) и цинка (41 %). Реже высокие концентрации фиксировались у хрома (27 %), кобальта (22 %), марганца и свинца (по 15 %).

Концентрации на уровне фона характерны для кобальта (44 %), марганца (43 %) и свинца (41 %). Для остальных элементов этот показатель варьирует от 25 % (Cu) до 39 % (Ni).

Самые низкие показатели концентрации (ниже фоновых значений) зафиксированы у мышьяка (56 % проб) и свинца (44 %). Реже всего значения ниже регионального фона встречались у никеля (14 %).

На основе расчетов I_{geo} и INI оценены экологические риски всех проанализированных ПТЭ. Анализ результатов расчетов (рис. 2, а) выявил значительную вариативность I_{geo} . Так, показатели индекса геоаккумуляции распределились следующим образом: для Pb значения варьировали в пределах от -3.54 до 1.52, для Ni — от -2.96 до 4.19, для Mn — от -2.42 до 1.64. Для остальных элементов интервалы составили: Co — от -2.82 до 1.98, Cr — от -4.63 до 4.11, Zn — от -2.52 до 1.39, Cu — от -1.53 до 3.53 и As — от -0.58 до 3.32. Доля As, которым наиболее загрязнены исследуемые почвы, занимает 38 % и относится к категории сильного загрязнения (табл. 2). Ранжирование исследуемых элементов по величине среднего индекса геоаккумуляции выявило следующую убывающую последовательность: As > Ni > Cu > Zn > Mn > Co > Cr > Pb > Cd.

Согласно расчету индекса INI , для большинства проб значения превысили единицу (среднее — 1.5, ме-

Таблица 1. Вариационно-статистическая характеристика содержания ПГЭ в почвах на территории промышленной площадки Айхальского горно-обогатительного комбината (n = 245), ppm

Table 1. Variational statistical characteristics of the content of hazardous elements in soils on the territory of the industrial site of the Aikhal Mining and Processing Division (n = 245), ppm

Элемент Elements	Множитель Multiplier	Породы* / Rocks*				Почвы / Soils							
		Доломиты, прослой мергелей нижнего ордовика O _{1ol} – O _{2-3kl} Lower Ordovician dolomites, marls layers	Мергели и известняки нижнего силура S ₁ Lower Silurian marls and limestones	Кимберлиты oD ₃ -C ₁		Фон*** Background	Среднее Mean	Среднее геом. Geometric mean	Медиана Median	Мин. Min	Макс. Max	КВ CV	CO SD
Pb	10 ⁻³	0.14–0.15	6.63	1.3	-	1.16	1.09	0.84	1.00	0.10	10.0	81.7	0.89
Ni	10 ⁻³	2.05–0.85	1.45	57.5	-	3.64	12.0	6.04	5.00	0.30	100	172.5	20.7
Mn	10 ⁻²	22.33–0.77	15.3	-	-	10.68	11.5	9.25	10.0	1.50	100	79.4	9.13
Cd	10 ⁻⁴	**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Co	10 ⁻³	5.97–2.82	0.94	4.95	4.59	2.36	2.81	2.09	2.00	0.10	15.0	74.7	2.10
Cr	10 ⁻³	6.64–2.80	6.63	86.5	113.6	11.58	17.8	10.9	10.0	0.50	300	143.8	25.6
Zn	10 ⁻³	0–0.23	0.47	-	-	7.65	14.6	9.31	10.0	0.10	1000	375.3	54.8
Cu	10 ⁻³	2.3–2.96	2.38	1.9	-	2.88	5.91	4.40	5.00	1.00	50.0	93.7	5.54
As	10 ⁻³	-	-	-	-	-	1.39	0.44	0.10	0.10	5.0	106.5	1.48

Примечание/Note: КВ/CV – коэффициент вариации/coefficient of variation; CO/SD – стандартное отклонение/standard deviation.

* – данные приведены по: Салихов и др., 2013; ** – не определялись; *** – значения регионального фона для почв природных ландшафтов Северо-Западной Якутии (Ягнышев и др., 2005)

* – data are given according to (Salikhov et al., 2013); ** – not determined, *** – regional background values for soils of natural landscapes of North-Western Yakutia (Yagnyshev et al., 2005)

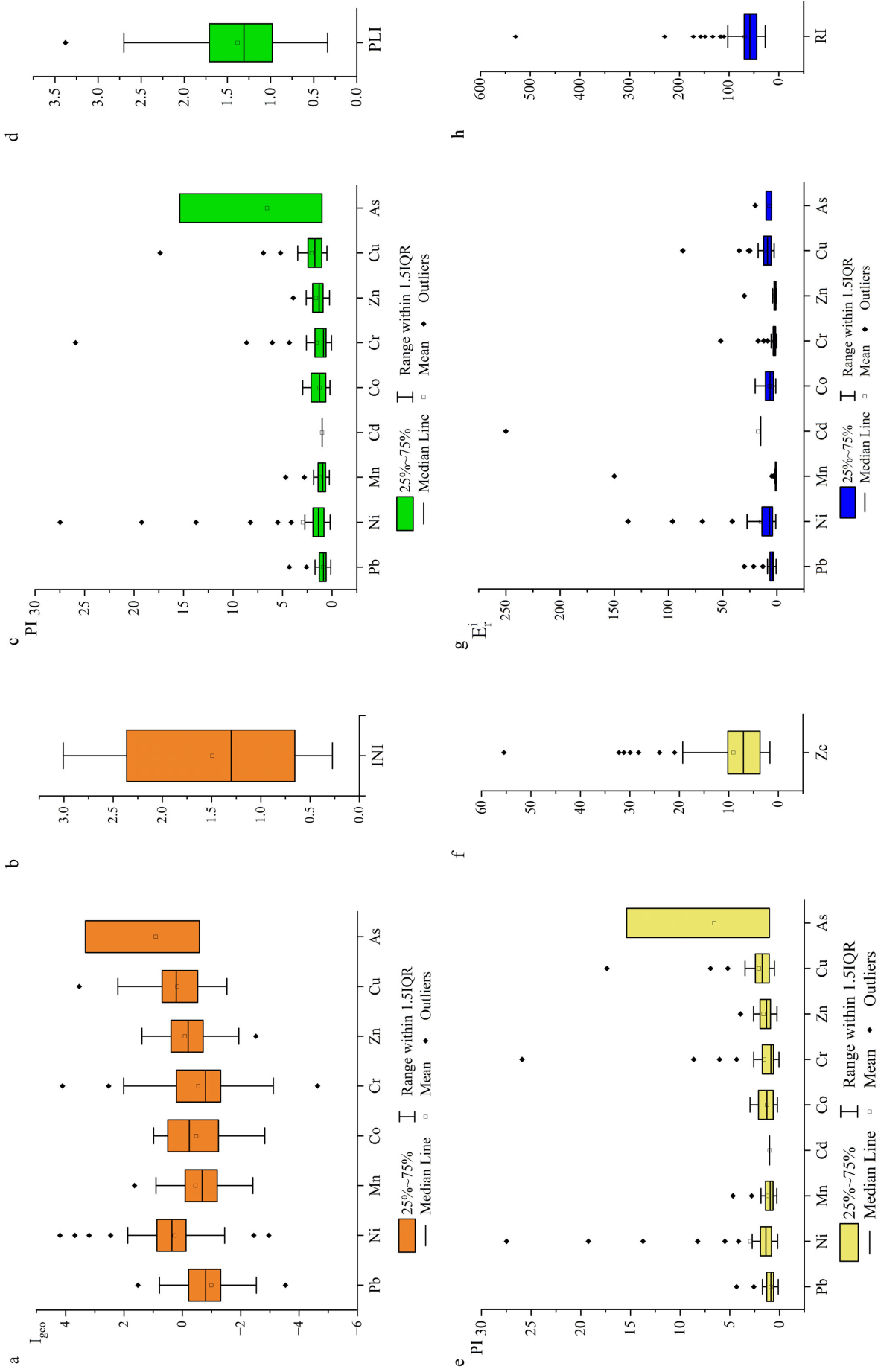


Рис. 2. Диаграммы коэффициентов и индексов загрязнения почв: а — индекс геоаккумуляции (I_{geo}), б — индекс Немерова (INI), с — индекс загрязнения (PI), д — индекс нагрузки загрязнения (PLI), е — коэффициент концентрации (Z_c), ф — индекс суммарного загрязнения (K_c), г — потенциал экологический фактор (E_i^j), h — индекс потенциального экологического риска (RI)

Fig. 2. Diagrams of pollution indices: а — geoaccumulation index (I_{geo}), б — Nemerov index (INI), с — index pollution (PI), д — pollution load index (PLI), е — coefficient concentration (Z_c), ф — total pollution index (K_c), г — potential environmental factor (E_i^j), h — potential environmental risk index (RI)

диана — 1.3; рис. 2, b) при общем диапазоне от 0.27 до 3.0. Распределение проб по категориям загрязнения — от «чистых» (13 %) до «сильно загрязненных» (1 %) — свидетельствует об общем росте концентраций ПТЭ в почвах промплощадки. Примечательно, что 44 % образцов относятся к категории от умеренно до сильно загрязненных. Пиковая нагрузка зафиксирована вблизи обогатительной фабрики № 14 (точка А-61), где индекс достиг своего максимума.

Индекс нагрузки загрязнения (*PLI*), рассчитанный из значений *PI* (рис. 2, c), обеспечивает простое сравнительное средство уровня ПТЭ на исследуемой территории, которое представляет собой количество превышений содержания определенного элемента в почве от естественной фоновой концентрации. Диапазоны значений коэффициента загрязнения (*PI*) для исследуемых элементов распределились следующим образом: свинец (0.13—4.31), никель (0.19—27.5), марганец (0.28—4.68), кобальт (0.21—2.97), хром (0.06—25.9), цинк (0.26—3.92), медь (0.52—17.36) и мышьяк (1.03—15.4). Ранжирование элементов по их среднему значению *PI* выявило, что наибольшее значение в загрязнении территории имеет мышьяк, а наименьшее — кадмий. Анализ средних показателей *PI* позволил сформировать убывающий ряд приоритетности ПТЭ: As > Ni > Cu > Zn > Cr > Co > Mn > Pb > Cd.

Наибольшая доля загрязнения приходится на As и составляет в сумме 100 %. Согласно результатам исследования, индекс загрязнения почвы (*PLI*) варьировал в пределах от 0.34 до 3.38, составив в среднем 1.38 (рис. 2, d). В большинстве отобранных проб значения превышают единицу, что подтверждает антропогенную нагрузку на почвенный покров. По степени загрязненности образцы распределились следующим образом: 28 % — незагрязненные, 60 % — от умеренно до сильно загрязненных, 11 % — умеренно загрязненные и только 1 % — от умеренно до сильно загрязненных. Критическая ситуация отмечена в районе обогатительной фабрики № 8 (точка III-2), где индекс достиг своего максимума: *PLI* = 1.3.

Суммарный показатель загрязнения (*Z_c*) основывается на расчете суммы коэффициентов концентрации (*K_c*) со значением >1.5 (рис. 2, e). Значения *Z_c* варьировали от 1,7 до 55.5 при медиане 9.1, что соответствует низкому уровню загрязнения (рис. 2, f).

Распределение значений коэффициента указывает на преимущественно благоприятную экологическую обстановку: 87 % данных соответствуют низкому уровню загрязнения. Средняя и высокая степени загрязнения зафиксированы в 10 и 2 % случаев соответственно. Аномальный пик значения *Z_c* = 57.5, характеризующий состояние в зоне аварийного разрыва пульповода хвостового хозяйства вблизи обогатительной фабрики № 14, отмечен в точке А-61. Лидирующие позиции среди загрязнителей занимают медь (64 %), никель (50 %) и цинк (48 %), демонстрируя наибольшую частоту превышения фоновых значений в исследуемых образцах.

Большие колебания рассчитанных коэффициентов отражают влияние различных геохимических обстановок, которые складываются из телескопирования в почве природной геохимической аномальности траппов и долеритов Алакит-Мархинского кимберлитового поля, техногенного воздействия объектов ин-

фраструктуры горно-обогатительных комбинатов и их совокупного эффекта.

Разброс значений выявлен и при расчёте индивидуального коэффициента токсичности элементов (рис. 2, g), что закономерно и для индекса потенциального токсикологического риска. Диапазон значений *E_tⁱ* исследуемых почв составляет: 0.1—51.8 — для Cr, 0.3—150.0 — для Mn, 1.1—20.0 — для Co, 0.96—137.4 — для Ni, 2.6—86.8 — для Cu, 0.3—30.0 — для Zn, 5.0—20.0 — для As и 0.7—30.0 — для Pb.

Согласно распределению средних значений коэффициента *E_tⁱ*, исследуемые элементы образуют убывающий ряд: Ni > Cu > As > Co > Pb > Cr > Mn > Zn > Cd. Как следует из данных таблицы 2, доминирующим загрязнителем является никель. Лидирующая позиция Ni объясняется эффектом «двойной нагрузки», при которой естественный геохимический фон усиливается техногенными выбросами.

Показатели потенциального экологического риска (*RI*) распределены в широком диапазоне: от 27.3 до 529.5 единиц (рис. 2, h). Несмотря на экстремальный максимум в точке А-61 (*RI* = 196.9), среднее значение составило 68.5, что классифицируется как низкий токсикологический риск. Подавляющее большинство проб (95 %) соответствуют низкому уровню риска, 4 % — умеренному, и лишь 1 % образцов указывает на значительную степень токсикологического риска на исследуемой территории.

Анализ рассчитанных индексов выявил на большей территории промышленной площадки Айхальского горно-обогатительного комбината в целом благополучную геоэкологическую ситуацию. При этом зафиксированы признаки высокого локального загрязнения. Вклад каждого ПТЭ у индексов загрязнения отличается (табл. 3). Различия в значениях рассчитанных индексов обусловлены спецификой их методологических подходов. Индекс *PLI* охватывает наиболее широкий спектр ПТЭ, обеспечивая комплексную качественную оценку загрязнения. Показатель *Z_c* включает меньший перечень элементов, так как учитывает только те коэффициенты, значения которых превышают фоновые. Применение индекса *INI* еще больше сузило спектр ПТЭ; данный метод минимизирует учет влияния геологических процессов на фоновые показатели и предполагает линейную зависимость уровня загрязнения от концентрации элемента. Индекс *RI* наиболее жестко фильтрует данные, так как интегрирует не только экологические, но и токсикологические эффекты.

Стабильное присутствие Ni во всех расчетных моделях подтверждает его статус основного загрязнителя, определяющего эколого-геохимическое и токсикологическое состояние почв исследуемой территории.

Применение совокупности индексов (*INI*, *PLI*, *Z_c*, *RI*) дает возможность разделить природный и техногенный вклад в элементный состав почв. Индексы *PLI* и *Z_c* идентифицируют группу элементов (As, Ni, Cu, Zn, Cr, Co, Mn), определяющих естественную геохимическую специфику почв региона, связанную с формированием природной геохимической аномальности, и определяют характер вторичного техногенного загрязнения при освоении и эксплуатации коренных месторождений алмазов. В свою очередь, индексы *INI* и *RI* акцентируют внимание на антропогенной состав-

Таблица 2. Распределение категорий загрязнения ПТЭ по коэффициентам загрязнения
Table 2. Distribution of pollution categories of the PTEs by pollution indices

Уровни загрязнения / Pollution levels	Градации значений Gradations of values	Коэффициент встречаемости, H_i (%) / Prevalence rate, H_i (%)									
		Pb	Ni	Mn	Cd	Co	Cr	Zn	Cu	As	
незагрязненный / unpolluted	$I_{geo} \leq 0$	90.2	48.0	78.4	100.0	70.6	72.5	52.0	35.3	61.8	
от незагрязненного до умеренно загрязненного unpolluted – moderately polluted	$0 < I_{geo} \leq 1$	8.8	37.3	19.6	0.0	29.4	20.6	45.1	46.1	0.0	
умеренно загрязненный / moderately polluted	$1 < I_{geo} \leq 2$	1.0	6.9	2.0	0.0	0.0	2.9	2.9	13.7	0.0	
от умеренно до сильно загрязненного moderately – heavily polluted	$2 < I_{geo} \leq 3$	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	2.9	0.0	3.9	0.0	
сильно загрязненный / heavily polluted	$3 < I_{geo} \leq 4$	0.0	5.9	0.0	0.0	0.0	2.9	0.0	3.9	38.2	
от сильно до чрезвычайно загрязненного heavily – extremely polluted	$4 < I_{geo} \leq 5$	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	
чрезвычайно загрязненный / extremely polluted	$I_{geo} > 5$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
низкий / low polluted	$PI \leq 1$	73.3	25.7	53.5	0.0	49.5	58.4	31.7	15.8	0.0	
средний / moderate polluted	$1 < PI \leq 3$	26.7	60.4	45.5	99.0	50.5	34.7	66.3	67.3	61.4	
высокий / high polluted	$PI > 3$	1.0	13.9	1.0	0.0	0.0	6.9	2.0	16.8	38.6	
отсутствует накопление / there is no accumulation	$K_c \leq 1.5$	90	50	80	100	73	73	52	36	100	
аккумуляция / accumulation	$K_c > 1.5$	10	50	20	0	27	27	48	64	0	
низкий экологический риск / low ecological risk	$E_r^i < 40$	100.0	99.0	99.0	99.0	100.0	99.0	100.0	99.0	100.0	
умеренный экологический риск / moderate ecological risk	$40 < E_r^i < 80$	0.0	2.9	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	
значительный экологический риск / considerable ecological risk	$80 < E_r^i < 160$	0.0	4.9	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	
высокий экологический риск / high ecological risk	$160 < E_r^i < 320$	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
очень высокий экологический риск / very serious ecological risk	$E_r^i > 320$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

Таблица 3. Элементы, определяющие эколого-геохимические риски по результатам расчетов индексов загрязнения почв промышленной площадки Айхальского горно-обогатительного комбината

Table 3. Integrated assessment of soil pollution indices at the industrial site of the Aikhal Mining and Processing Plant

Оценка общих экологических рисков Assessment of general environmental risks	Индекс нагрузки загрязнения Pollution load index	Суммарный коэффициент загрязнения Total pollution coefficient	Индекс потенциального риска Potential risk index
INI	PLI	Z_c	RI
As, Ni, Cu	As, Ni, Cu, Zn, Cr, Co, Mn	As, Ni, Cu, Zn, Cr	Ni

ляющей, выделяя Ni, As и Cu как основные маркеры техногенной нагрузки.

Визуализация индексов загрязнения на картах-схемах послужила инструментом для определения наиболее проблемных геоэкологических зон. Полученные пространственные конфигурации для индексов INI ,

PLI , Z_c и RI оказались идентичными (рис. 3), подтверждающая единообразие в распределении как фоновых зон с природным допустимым уровнем концентрации ПТЭ в почвах, так и очагов сильного загрязнения.

Анализ расположения участков с умеренным и высоким экологическим риском, концентрации потен-

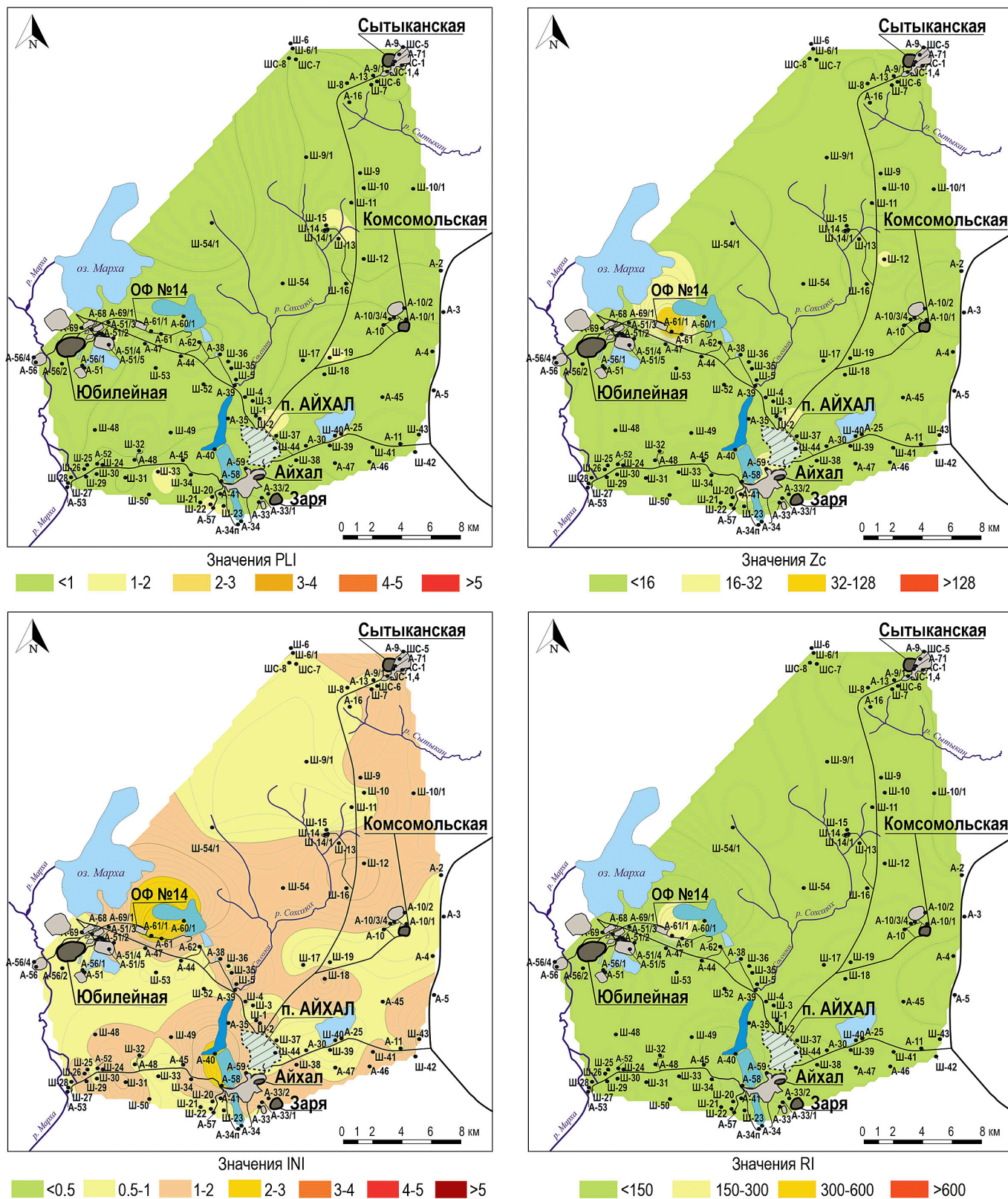


Рис. 3. Карта-схема пространственного распределения индексов загрязнения в почвах промышленной площадки Айхальского горно-обогатительного комбината

Fig. 3. Map-scheme of the spatial distribution of pollution indices in soils of the industrial site of the Aikhal Mining and Processing Plant



циально токсичных элементов и специфики микроэлементного состава почв подтверждает, что именно промышленные объекты, входящие в инфраструктуру обогатительных фабрик, выступают ключевым фактором техногенного воздействия. Следовательно, в границах выделенных участков повышенного геоэкологического риска можно ожидать усиление нагрузки в целом на компоненты окружающей среды.

Выводы

Проведенное исследование позволило охарактеризовать текущее геоэкологическое состояние почв в районе промышленной площадки Айхальского ГОКа. Выявлена существенная пространственная неоднородность микроэлементного состава почвенного покрова. Наиболее выраженная вариативность концентраций отмечена для Mn, Cr, Zn, а также для Ni.

Анализ экологических индексов (*INI*, *PLI*, Z_c и *RI*) показал, что состояние почвенного покрова промплощадки оценивается как преимущественно допустимое, несмотря на наличие зон выраженного локального загрязнения.

Расчеты выявили ключевой вклад As, Ni и Cu по индексу *INI*, As, Ni, Cu, Zn, Cr, Co, Mn по *PLI* и As, Ni, Cu, Zn, Cr по Z_c . При этом индекс экологического риска определяется преимущественно содержанием Ni. В целом никель — это единственный элемент, значимый во всех моделях расчета. Это подтверждает, что он является главным фактором экологического риска для почв промышленной площадки Айхальского ГОКа.

Использование системы геохимических индексов позволило разграничить источники аккумуляции ПТЭ в почвах промышленной площадки Айхальского ГОКа. Так, индексы *PLI* и Z_c указывают на природное происхождение повышенных концентраций в почве As, Ni, Cu, Zn, Cr, Co и Mn, формирующих геохимический облик территории еще до начала освоения алмазных месторождений Алакит-Мархинского кимберлитового поля. При этом индексы *INI* и *RI* выявляют непосредственный техногенный след, выраженный в повышенном накоплении Ni, As и Cu, что свидетельствует об их антропогенном привносе.

С помощью карт пространственного распределения удалось наглядно выделить районы с наихудшей геоэкологической обстановкой. Анализируемые индексы демонстрируют схожую динамику, позволяя выделить на исследуемой территории как благополучные участки, так и локальные площадки высокой геоэкологической напряженности, приуроченные к территориям обогатительных фабрик.

Таким образом, проведенные исследования выявили методологические различия при анализе индексов загрязнения *INI*, *PLI*, Z_c и *RI*. На примере восьми потенциально токсичных элементов видно, что выбор индекса напрямую влияет на широту спектра выявленных загрязнителей. На основании этого проявляется четкая иерархия чувствительности индексов: переход от общего загрязнения (*PLI*) к учету превышений значений регионального фона (Z_c) и далее к анализу токсичности (*RI*) закономерно сужает список значимых ПТЭ. Применение *INI* позволяет более точно отсеять естественные геохимические аномалии от техногенного воздействия.

Примененная схема оценки эколого-геохимического состояния промышленных площадок не только показывает зоны повышенного геоэкологического риска, позволяет провести ранжирование по степени геоэкологической напряженности, но и дает возможность обоснования характера нагрузки и интерпретации полученных микроэлементных спектров.

Статья подготовлена в рамках проекта по гранту РФФ №24-27-20128 «Исследование, идентификация и оценка потенциального геоэкологического риска загрязнения природной среды при поисках и освоении месторождений полезных ископаемых в резко континентальных биоклиматических условиях».

Литература / References

- Афанасьев В. П., Зинчук Н. Н., Похиленко Н. П. Морфология и поисковое значение индикаторных минералов кимберлитов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. 276 с.
- Afanasyev V. P., Zinchuk N. N., Pokhilenko N. P. Morphology and exploration value of indicator minerals of kimberlites. Novosibirsk: Publishing house of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2001. 276 p. Russian.
- Белошейкина А. В., Таловская А. В., Язиков Е. Г. Эколого-геохимическая оценка состояния почвенного покрова территории Сорского горно-обогатительного комбината (Республика Хакасия) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 1. С. 44—53.
- Belosheykina A. V., Talovskaya A. V., Yazikov E. G. Ecological and geochemical assessment of Sorsk mining and processing plant soil cover (republic of Khakassia). Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2020;331(1):44—53. Russian.
- Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды Республики Саха (Якутия) в 2021 году. Якутск, 2022. 776 с.
- State report on the state and protection of the environment of the Republic of Sakha (Yakutia) in 2021. Yakutsk; 2022. 776 p. Russian.
- Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды Республики Саха (Якутия) в 2024 году. Якутск, 2025. 53 с.
- State report on the state and protection of the environment of the Republic of Sakha (Yakutia) in 2024. Yakutsk; 2025. 53 p. Russian.
- Гололобова А. Г. Оценка потенциального геоэкологического риска загрязнения почвенного покрова при освоении коренных месторождений алмазов (на примере Далдыно-Алакитского горнопромышленного района) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2025. Т. 336. № 3. С. 7—17. DOI: 10.18799/24131830/2025/3/4785
- Gololobova A. G. Assessment of the potential geoecological risk of soil contamination during the development of primary diamond deposits (using the Daldyno-Alakitsky mining region as an example). Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering. 2025;336(3):7—17. Russian.
- Костровицкий С. И. Петрохимические и геохимические типы кимберлитов якутской провинции, их алмазоносность // Проблемы прогнозирования и поисков месторождений алмазов на закрытых территориях:

- Материалы конференции, посвященной 40-летию ЯНИГП ЦНИГРИ АК «АЛРОСА» / Акционерная компания «АЛРОСА» (ЗАО), Якутское научно-исследовательское геологоразведочное предприятие (ЯНИГП) ЦНИГРИ. 2008. С. 22–27.
- Kostrovitsky S. I.* Petrochemical and geochemical types of kimberlites of the Yakut province, their diamond potential. Problems of forecasting and prospecting for diamond deposits in closed areas: Proceedings of the conference dedicated to the 40th anniversary of the Yakut Scientific Research Geological Exploration Enterprise ALROSA. ALROSA Company, Yakut Scientific Research Geological Exploration Enterprise; 2008. p. 22–27. Russian.
- Легостаева Я. Б., Гололобова А. Г.* Особенности распределения микроэлементов в почвах фоновых и импактных зон на участках алмазодобычи на северо-западе Сибирской платформы // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332. № 9. С. 142–153. DOI: 10.18799/24131830/2021/9/3364
- Legosteva Ya. B., Gololobova A. G.* Features of the distribution of trace elements in soils of background and impact zones at diamond mining sites in the northwest of the Siberian platform. Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering. 2021;332(9):142–153. Russian.
- Никифоров А. А., Миронова С. И.* Техногенная трансформация растительности на территории Айхальского горно-обогатительного комбината (Западная Якутия). Arctic Environmental Research. 2017. Т. 17, № 1. С. 14–20. DOI: 10.17238/issn2541-8416.2017.17.1.14
- Nikiforov A. A., Mironova S. I.* Technogenic transformation of vegetation on the territory of the Aikhal Mining and Processing Division (Western Yakutia). Arctic Environmental Research. 2017;17(1):14–20. Russian.
- Макаров В. Н.* Эколого-геохимическая оценка техногенного воздействия на окружающую среду Якутии // География и природные ресурсы. 2010. № 1. С. 45–48.
- Makarov V. N.* Ecological and geochemical assessment of technogenic impact on the environment of Yakutia. Geography and natural resources. 2010;1:45–48. Russian.
- Мировая* реферативная база почвенных ресурсов: Международная система почвенной классификации для диагностики почв и составления легенд почвенных карт. М.: МАКС Пресс, 2024. 248 с.
- World Reference Database of Soil Resources.* International Soil Classification System for Soil Diagnostics and Soil Map Legends. Moscow: MAKS Press; 2024. 248 p. Russian.
- Поспеева Е. В., Толстов А. В.* Новые перспективы Алакит-Мархинского кимберлитового поля на проявление кимберлитового магматизма // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2024. № 29(1). С. 20–37. DOI: 10.31242/2618-9712-2024-29-1-20-37
- Pospeeva E. V., Tolstov A. V.* New prospects of the Alakit-Markhinsky kimberlite field for the manifestation of kimberlite magmatism. Natural resources of the Arctic and Subarctic. 2024;29(1):20–37. Russian.
- Россыпи алмазов мира.* М.: Геоинформмарк, 2005. 747 с.
- Placers of diamonds of the world.* Moscow: Geoinformmark; 2005. 747 p. Russian.
- Салихов Р. Ф., Салихова В. В., Иванюшин Н. В., Охлопков В. И.* Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000. Серия Верхневилуйская. Лист Q-49-XXI, XXII (Айхал). Объяснительная записка. М.: МФ ВСЕГЕИ, 2013.
- Salikhov R. F., Salikhova V. V., Ivanyushin N. V., Okhlopkov V. I.* State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:200,000. Verkhnevilyuyskaya Series. Sheet Q-49-XXI, XXII (Aikhal). Explanatory Note. Moscow: MF VSEGEI, 2013. Russian.
- Сорокина О. А., Киселев В. И.* Загрязнение почв в зоне освоения Джалиндинского россыпного и рудного месторождений золота в Приамурье // Экология и промышленность России. 2005. № 7. С. 24–28.
- Sorokina O. A., Kiselev V. I.* Soil contamination in the development zone of the Dzhalinginsky placer and ore gold deposits in the Amur region. Ecology and industry in Russia; 2005. Vol. 7; p. 24–28. Russian.
- Шадринова О. В., Легостаева Я. Б.* Техногенный педогалогенез на территории Алакит-Мархинского кимберлитового поля (Якутия, Россия) // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2025. № 3(227). С. 122–134. DOI: 10.18522/1026-2237-2025-3-122-134
- Shadrinova O. V., Legosteva Ya. B.* Technogenic pedohalogenesis on the territory of the Alakit-Markhinsky kimberlite field (Yakutia, Russia). News of higher educational institutions. North Caucasus region. Series: Natural sciences. 2025;3(227):122-134. Russian.
- Ягнышев Б. С., Ягнышева Т. А., Зинчук М. Н., Легостаева Я. Б.* Экология Западной Якутии (геохимия геосистем: состояние и проблемы). Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2005. 432 с.
- Yagnyshev B. S., Yagnysheva T. A., Zinchuk M. N., Legosteva Ya. B.* Ecology of Western Yakutia (geochemistry of geosystems: state and problems). Yakutsk: Publishing house YANTS SB RAS; 2005. 432 p. Russian.
- Янин Е. П.* Техногенные илы в реках Московской области (геохим. особенности и экол. оценка). М.: ИМГРЭ, 2004. 96 с.
- Yanin E. P.* Man-made Silts in Rivers of the Moscow Region: (Geochemical Features and Ecological Assessment). Moscow: IMGRE; 2004. 96 p. Russian.
- Янников А. М., Янникова С. А., Овчинникова М. Ю., Корепанов А. Ю.* Использование многолетнемерзлых пород для закачки дренажных вод коренных месторождений алмазов на примере участка «Ноябрьский» (рудник «Айхал») // Вестник Пермского университета. 2021. Т. 20. № 3. С. 284–299. DOI: 10.17072/psu.geol.20.3.284
- Yannikov A. M., Yannikova S. A., Ovchinnikova M. Yu., Korepanov A. Yu.* Using permafrost rocks for pumping drainage water from primary diamond deposits: the example of the Noyabrsky site (Aikhal mine). Perm University Bulletin. 2021;20(3):284–299. Russian.
- Abliz A., Shi Q., Abulizi A.* Contamination status and health risk assessment of soil heavy metals in the northern slope of eastern Tianshan mountains industrial belt in Xinjiang, Northwest China. Forests; Vol. 13. 2022. p. 1914. DOI: 10.3390/f13111914.
- Adlane B., Xu Z., Xu X., Lian L., Han J., Qiu G.* Evaluation of the potential risks of heavy metal contamination in rice paddy soils around an abandoned Hg mine area in Southwest China. Acta Geochimica. Vol. 39. 2020. p. 85–95. DOI: 10.1007/s11631-019-00364-8.
- Chen Y., Zhao J., Chen X., Zheng L.* Analysis of the source apportionment and pathways of heavy metals in soil in a



- coal mining area based on machine learning and an APCS-MLR Model. *Minerals*. Vol. 14. 2024. p. 54. DOI: 10.3390/min14010054
- Khadija B., Abdelhak B., Mohamed T.* Trace metals distribution and fractionation in soils around the abandoned “Ichomoul” Pb-Zn Mill-Mine, north-east of Algeria. *Pollution*. 2021;7(3):511–526. DOI: 10.22059/poll.2021.317521.1003
- Siegel F. R.* Environmental geochemistry of potentially toxic metals. Vol. 32. Berlin: Springer; 2002. 218 p.
- Umeobi E. C., Ducey T. F., Johnson M. G., Ippolito J. A.* Soil health alterations via compost additions to natural and remediated heavy metal-contaminated mineland soils. *Environ Sci Pollut Res*. Vol. 32. 2025. p. 14968–14979. DOI: 10.1007/s11356-025-36602-1
- Wang Q., Cai J., Gao F., Li Z., Zhang M.* Pollution level, ecological risk assessment and vertical distribution pattern analysis of heavy metals in the tailings Dam of an Abandon Lead-Zinc Mine. *Sustainability*. Vol. 15. 2023. P. 11987. DOI: 10.3390/su151511987

Поступила в редакцию / Received 13.01.2026



Хроника, события, факты • Chronicle, events, facts

Институт геологии имени академика Н. П. Юшкина
16–18 июня 2026 года в г. Сыктывкаре проводит
Российскую конференцию

**«Тиманиды-протоуралиды
Европейского Северо-Востока:
стратиграфия, магматизм,
геодинамика, металлогения»**
и приглашает принять участие.



In Syktyvkar on June 16–18, 2026,
the Institute of Geology named after Academician N. P. Yushkin
will hold the Russian Conference

**"Timanides-Protouralides
of the European Northeast:
Stratigraphy, Magmatism,
Geodynamics, Metallogeny"**
and invites you to participate.

Конференция посвящена памяти выдающегося исследователя
геологии Европейского Северо-Востока, кандидата геолого-минералогиче-
ских наук Всеволода Георгиевича Оловянишникова (1936–2006).

Научная конференция ставит целью организовать широкую встречу геологов, ученых, всех заинтересованных лиц для представления последних достижений в области геологии тиманид-протоуралид Европейского Северо-Востока, включающего Канино-Тиманскую гряду, фундамент Печорской синеклизы, северные районы Урала, Пай-Хой и сопредельные территории.

Тематика конференции:

1. Глубинное строение, тектоника и геодинамика структурно-вещественных комплексов верхнего докембрия – кембрия
2. Разработка и актуализация стратиграфических схем тиманид-протоуралид
3. Изотопно-геохронологический, изотопно-геохимический и палеонтологический методы в решении вопросов стратиграфии верхнего докембрия – кембрия
4. Реконструкция обстановок осадконакопления в позднем докембрии – кембрии территории Европейского Северо-Востока и смежных территорий
5. Расчленение, корреляция и возрастные ограничения магматических комплексов тиманид-протоуралид Европейского Северо-Востока и смежных территорий
6. Рудообразование и металлогения тиманид-протоуралид Европейского Северо-Востока и смежных территорий

Бюро оргкомитета

Председатели:

И. Н. Бурцев, к. г.-м. н., ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар
Н. Б. Кузнецов, чл.-корр. РАН, ГИН РАН, Москва

Заместители:

С. К. Кузнецов, д. г.-м. н., ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар
А. М. Пыстин, д. г.-м. н., ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар

Уч. секретарь:

О. В. Гракова, к. г.-м. н., ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар

Адрес:

Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, ул. Первомайская, д. 54,
Сыктывкар, Республика Коми, 167982

Контакты:

(8212) 24-53-53 – приемная директора
(8212) 44-71-51 – **Козырева Ирина Владимировна**
(ученый секретарь ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН)
+7-904-272-43-82 – **Гракова Оксана Васильевна**
+7-908-717-19-38 – **Пыстин Александр Михайлович**
(оргкомитет конференции)
Факс: (8212) 24-09-70, 24-53-46
Эл. почта: geo2026@geo.komisc.ru
Сайт: <https://geo.komisc.ru>

The conference is dedicated to the memory of Cand. Sci. (geology and mineralogy) Vsevolod Georgievich Olovyanishnikov (1936–2006), a distinguished researcher in the geology of the European Northeast.

The scientific conference aims to organize a broad meeting of geologists, researchers, and all relevant parties to present the latest advances in the geology of the Timanides-Protouralides of the European Northeast, including the Kanin-Timan Ridge, the basement of the Pechora syncline, the northern Urals, Pai-Khoi, and adjacent territories.

Conference Topics:

1. Deep structure, tectonics and geodynamics of Upper Precambrian-Cambrian structural-composition complexes
2. Development and updating of Timanide-Protouralide stratigraphic schemes
3. Isotope-geochronological, isotope-geochemical, and paleontological methods in resolving Upper Precambrian-Cambrian stratigraphy issues
4. Reconstruction of Late Precambrian-Cambrian sedimentation environments in the European Northeast and adjacent territories
5. Subdivision, correlation and age constraints of Timanide-Protouralide igneous complexes in the European Northeast and adjacent territories
6. Ore formation and metallogeny of the Timanide-Protouralide complexes in the European Northeast and adjacent territories

Bureau of the Organizing Committee

Chairmen:

I. N. Burtsev, Cand. Sci. (geology and mineralogy), Institute of geology FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar
N. B. Kuznetsov, RAS Corresponding Member, GIN RAS, Moscow

Deputies:

S. K. Kuznetsov, Dr. Sci. (geology and mineralogy), Institute of geology FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar
A. M. Pystin, Dr. Sci. (geology and mineralogy), Institute of geology FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar

Academic Secretary:

O. V. Grakova, Cand. Sci. (geology and mineralogy), Institute of geology FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar

Address:

Institute of geology FRC Komi SC UB RAS, 54 Pervomayskaya St.,
Syktyvkar, Komi Republic, 167982, Russia

Contacts:

+7 (8212) 24-53-53 – Director's Office
+7 (8212) 44-71-51 – **Irina Vladimirovna Kozyreva**
(Academic Secretary of the Institute of geology Komi SC UB RAS)
+7-904-272-43-82 – **Oksana Vasilyevna Grakova**
+7-908-717-19-38 – **Alexander Mikhailovich Pystin**
(Conference Organizing Committee)
Fax: +7 (8212) 24-09-70, 24-53-46
Email: geo2026@geo.komisc.ru **Website:** <https://geo.komisc.ru>

Редакторы издательства:

О. В. Габова, К. В. Ордин (английский)

Компьютерная верстка

А. Ю. Перетягина

Выписка из реестра средств массовой информации ПИ № ФС77-75435 от 19.04.2019, выданное Роскомнадзором. Отпечатано: 31.03.2026. Формат бумаги 60 × 84 1/8. Печать RISO. Усл. п. л. 7,5. Тираж 140. Заказ 1261. Учредитель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук» (ФИЦ Коми НЦ УрО РАН). Редакция, издатель: Институт 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, издателя, типографии: 167982, Республика Коми, Сыктывкар, Первомайская, 54. Тел.: (8212) 24-51-60. Эл. почта: vestnik@geo.komisc.ru.

На обложке использованы фото Е. Антроповой, А. Перетягина, М. Сокерина, Р. Шуктомова