

Научная статья
УДК 552.545: 550.46
doi: 10.17223/25421379/37/6

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД И ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ ТРАВЕРТИНОВ ТАЛОВСКИХ ЧАШ (КОЛЫВАНЬ-ТОМСКАЯ СКЛАДЧАТАЯ ЗОНА, ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ)



Мухриддин Шамсиддин угли Садиров¹, Ирина Валентиновна Вологодина²,
Екатерина Матвеевна Дутова³, Евгения Михайловна Асочакова⁴,
Платон Алексеевич Тишин⁵, Элдор Шавки угли Туробов⁶

^{1, 2, 3, 4, 5} Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

³ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

⁶ Самаркандский государственный университет им. Шарофа Рашидова, Самарканд, Узбекистан

¹ sadirovmuhriddin02@gmail.com

² ivv@mail.tsu.ru

³ dutova@tpu.ru

⁴ ev.asochakova@gmail.com

⁵ tishin_pa@mail.ru

⁶ turoboveldor@gmail.com

Аннотация. Исследованы геохимия подземных вод и состав травертинов Таловских чаш (Колывань-Томская складчатая зона). В составе травертиновых построек установлены кальцит, бернессит, терригенная примесь кварца и глинистых минералов. Выявлены высокие концентрации ряда микроэлементов и положительная Eu-аномалия, что указывает на глубинное происхождение питающих флюидов и их восстановительный характер. Травертины выступают как эффективный геохимический барьер, концентрирующий элементы при разгрузке подземных вод.

Ключевые слова: Таловские чаши, травертин, бернессит, морфология, подземные воды, редкоземельные элементы, Колывань-Томская складчатая зона, Западная Сибирь

Источник финансирования: исследование выполнено при финансовой поддержке госзадания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSWM-2025-0015).

Для цитирования: Садиров М.Ш., Вологодина И.В., Дутова Е.М., Асочакова Е.М., Тишин П.А., Туробов Э.Ш. Геохимические особенности подземных вод и вещественный состав травертинов Таловских чаш (Колывань-Томская складчатая зона, Западная Сибирь) // Геосферные исследования. 2025. № 4. С. 90–105. doi: 10.17223/25421379/37/6

Original article
doi: 10.17223/25421379/37/6

GEOCHEMICAL FEATURES OF GROUNDWATER AND MATERIAL COMPOSITION OF TRAVERTINES OF THE TALOVSKIYE CHASHI (KOLYVAN-TOMSK FOLDED ZONE, WESTERN SIBERIA)

Mukhriddin Sh. Sadirov¹, Irina V. Vologdina², Ekaterina M. Dutova³,
Evgeniya M. Asochakova⁴, Platon A. Tishin⁵, Eldor Sh. Turobov⁶

^{1, 2, 3, 4, 5} National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

³ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

⁶ Samarkand State University named after Sharof Rashidov

¹ sadirovmuhriddin02@gmail.com

² ivv@mail.tsu.ru

³ dutova@tpu.ru

⁴ ev.asochakova@gmail.com

⁵ tishin_pa@mail.ru

⁶ turoboveldor@gmail.com

Abstract. The article presents the results of a comprehensive study of the geochemical features of groundwater and the material composition of the travertines of the Talovskiye Chashi, located in the Kolyvan-Tomsk folded zone (Western Siberia). The study of this object is relevant for understanding the processes of modern mineral formation in groundwater discharge zones, assessing

the influence of deep fluids, and the role of geochemical barriers in the concentration of trace elements. The aim of the work was to establish the relationship between the composition of groundwater feeding the travertine structures and the mineralogical and geochemical characteristics of the forming carbonate sediments. A complex of analytical methods included optical and electron (SEM) microscopy, X-ray diffraction analysis (XRD), inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES) and inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) for the determination of major, trace and rare earth element composition.

It was established that the travertines of the Talovskiy Chashi are represented by two main varieties: calcite and birnessite-calcite. The calcite content reaches 87–98 %. The presence of birnessite (up to 7 %), a manganese oxyhydroxide, gives the samples a dark color and is associated with oxidative conditions at the geochemical barrier.

Geochemical studies showed that travertines are generally depleted in most trace elements relative to the Clarke of carbonate rocks. However, a sample from the common flow shows increased concentrations of typically lithophile elements (Ti, Zr, Nb, Sc, Cr), which is explained by an increase in clastic (terrigenous) admixture. Special attention is paid to the behavior of rare earth elements (REE). It was found that travertines effectively concentrate REE ($\sum \text{REE} = 0.45\text{--}15.15 \text{ mg/kg}$) by 3–4 orders of magnitude compared to water ($\sum \text{REE max } 0.00023 \text{ } \mu\text{g/l}$). All travertines are characterized by significant enrichment in light REE (LREE). A key indicator of fluid origin is europium: an extremely positive Eu anomaly ($\text{Eu/Eu}^* = 6.05\text{--}8.17$) was recorded in the travertines of the Udivitel'naya chasha, which is a reliable sign of hydrothermal influence and the inflow of deep reduced waters enriched in Eu^{2+} . The waters themselves also show positive Eu anomalies and a Ce deficit, which further confirms their deep, rather than infiltration, nature.

Thus, the travertines of the Talovskiy Chashi represent not only a unique natural object but also an informative geochemical indicator system, recording complex water-rock interaction processes, migration, and differentiation of elements at the boundary between deep fluids and surface conditions. The results contribute to the understanding of the mechanisms of meteorogenic travertine formation in tectonically active areas and can be used in the reconstruction of paleohydrogeochemical settings.

Keywords: *Talovskiy Chashi, travertine, birnessite, morphology, groundwater, rare earth elements, Kolyvan-Tomsk folded zone, Western Siberia*

Source of financing: The research was carried out within the framework of the State assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FSWM-2025-0015).

For citation: Sadirov M.Sh., Vologdina I.V., Dutova E.M., Asochakova E.M., Tishin P.A., Turobov E.Sh. (2025) Geochemical features of groundwater and material composition of travertines of the Talovskiy chashi (Kolyvan-Tomsk folded zone, Western Siberia). *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 4. 90–105. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/37/6

Введение

Травертин (известковый туф) – это пористая карбонатная порода, образовавшаяся в результате хемогенного осаждения карбонатов кальция из термальных или холодных углекислых источников [Уткин, 2003; Pentecost, 2005; Юшкин 2009; Рихванов и др., 2012; Capezzuoli et al., 2014; Деев и др., 2017; Giustini et al., 2018; Yang et al., 2024]. Травертинообразование характерно для многих современных тектонически активных областей, и его рассматривают как показатель активности разломов и зон повышенной трещиноватости, контролирующей распределение травертиновых полей [Деев и др., 2017]. Согласно общепринятой классификации [Pentecost, Viles, 1994; Giustini et al., 2018], травертины по источнику углекислоты, изотопно-геохимическим характеристикам делятся на два класса: термогенные и метеогенные. Термогенные травертины имеют глубинный источник углекислоты, исследователи указывают на тесную связь между циркуляцией травертинообразующих флюидов и активными разломами [Деев, Кох, 2024]. Метеогенные травертины формируются преимущественно из биогенного или атмосферного углекислого газа, растворенного в неглубоких водоносных горизонтах.

В Западной Сибири, в пределах Колывань-Томской складчатой зоны и Салаира, широко развиты

процессы карбонатообразования и яркого морфологического его проявления – травертинообразования из холодных пресных вод [Копылова и др., 1971; Петрова и др., 2002; Дутова, 2001; Шварцев и др., 2007; Вологодина и др., 2015; Кох и др., 2018; Dutova, 2020]. Особые гидрогеохимические условия этого региона способствуют формированию метеогенных травертиновых построек преимущественно известкового состава, с примесями железистых и марганцевых фаз, в зависимости от состава отлагающих их вод.

В нашей работе приведены результаты изучения геохимии (микроэлементного состава) природных вод и комплексного анализа травертинов Таловских чаш, включая их минералогический состав, морфологию и геохимию. Проведенные исследования дополняют имеющиеся представления о процессах формирования вторичных минеральных фаз в ходе эволюции системы «вода–порода». Теория взаимодействия воды с горными породами разработана С.Л. Шварцевым, одним из положений которой является представление о формировании разнообразных гидрогенно-минеральных комплексов [Шварцев, 1998, 2008; Геологическая..., 2007].

1. Объекты, материалы и методы исследования

1.1. Объект исследования. Территория исследований расположена в Томском районе в северо-восточ-

ной части Колывань-Томской складчатой зоны, которая является естественной областью распространения травертинов [Копылова и др., 1971; Минерагения..., 2001]. Она входит в Центрально-Западно-Сибирскую (Обь-Зайсанскую) складчатую систему, на востоке и юго-востоке ограничена Томским надвигом [Кошкарёв, 2002].

Колывань-Томская складчатая зона в Томском районе представлена Томским прогибом – это крупный синклиниорий, выполненный терригенными флишевыми отложениями девона–карбона мощностью около 6 км [Геологическое строение..., 1987; Гудымович и др., 2009; Парначёв, 2010]. Томский прогиб имеет чешуйчато-складчатое строение и состоит из серии крупных линейных складок, разделённых системой продольных надвигов, сбросов и взбросов, также широко проявлены поперечные и диагональные системы нарушений. Район характеризуется системой тектонических трещин западного и северо-западного простирания, к которым приурочены дайки «томских диабазов» и долины рек Тугояковка, Басандайка, Ушайка и Киргизка, а также холодные источники, образующие карбонатные травертины [Минералогия..., 2001; Петрова и др., 2002; Уткин, 2002; Лепокурова, 2005].

Подземные воды изучаемого региона характеризуются сложным режимом, разнообразием химического состава и сложными условиями залегания. Исследователи выделяют в регионе два геолого-гидрогеологических структурных этажа: верхний – мезозойско-кайнозойский, представленный толщей рыхлых отложений, с пластовыми водами; нижний – складчатый протерозойско-палеозойский фундамент, сложенный терригенными породами, известняками, мраморами, амфиболитами, вулканитами, обводненными преимущественно в верхней трещиноватой зоне (трещинные воды) [Удодов, 1971; Колубаева и др., 2010; Колубаева, 2012]. Наиболее интересны воды зон разрывных нарушений, с которыми связывают формирование травертинов и других минеральных новообразований. Трещинные воды отличаются более высокой минерализацией (0,6–0,8 г/л), спецификой газового состава, постоянным дебитом источника [Петрова и др., 2002].

Объектом исследования являются травертиновые постройки «Таловские чаши», расположенные в 40 км к юго-востоку от г. Томска в верховьях реки Басандайки (рис. 1, а) и отнесенные к памятникам природы. На его территории отмечается несколько известковых чаш различных форм и размеров, сформировавшихся в местах выхода родников на поверхность, стенки чаш протягиваются вдоль по потоку на некоторое расстояние (рис. 1, б). Наиболее крупная травертиновая чаша (Удивительная) имеет площадь 2 м², высота её стенок около 1 м, толщина 20–30 см,

заполнена водой. Родники приурочены к толще четвертичных отложений, представленных лёссовидными суглинками.

Дебит источника, вокруг которого сформирована чаша Удивительная, составляет около 1 л/с (июль – август). Родник зимой не замерзает, и температура воды колеблется в пределах 4–5 °С. Согласно опубликованным данным, воды родников являются пресными (300–1100 мг/л), нейтральными или слабощелочными (рН 6,6–8,4) гидрокарбонатными кальциевыми или кальциево-магниевыми. Средняя минерализация подземных вод составляет 580 мг/л. Содержание в воде свободного СО₂ достигает 120 мг/л, что в 6 раз больше фоновых содержаний [Шварцев и др., 2007].

1.2. Материалы и методы. Материал для исследований был отобран в летний период 2024 г. (июль). Образцы травертинов и пробы воды отобраны из двух чаш: из чаши Удивительная и чаши меньшего размера. Образец из чаши Удивительная разделен на две части – существенно карбонатного состава (1) и с примесью бернесситовой фазы (2) (см. рис. 2). Также образцы травертинов и проба воды отобраны в месте общего стока с чаш, в 20 м от истока родников.

Особенности состава и строения травертинов изучены в шлифах в проходящем свете с использованием оптического микроскопа Leica DM750P с цифровой камерой Leica MC170 HD, с помощью аналитического комплекса сканирующего электронного микроскопа (РЭМ) TESCAN Mira III LMU в сочетании с системой анализа элементного состава AZTEC ADVANCED. Диагностика общего минерального состава проводилась с использованием методов рентгенофазового анализа на дифрактометре X'Pert PRO (PANalytical, Нидерланды).

Химический состав травертинов анализировался методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-AES) (спектрометр серии iCAP 7400 Duo Termo Fisher Scientific, США). Определение содержания микроэлементов выполнялось посредством масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) на приборе Agilent 7500 (Agilent Technologies, США).

Аналитические исследования выполнены с использованием оборудования Томского регионального центра коллективного пользования Национального исследовательского Томского государственного университета.

Для выявления характера концентрирования микроэлементов в травертинах и водах использовались подходы нормирования относительно соответствующих кларковых значений. Распределение микроэлементов в травертине нормировалось по кларку осадочных карбонатных пород, в воде – по кларку речной воды [Gromet et al., 1984; Тейлор, МакЛеннан, 1988; Goldstein, Jacobsen, 1988].

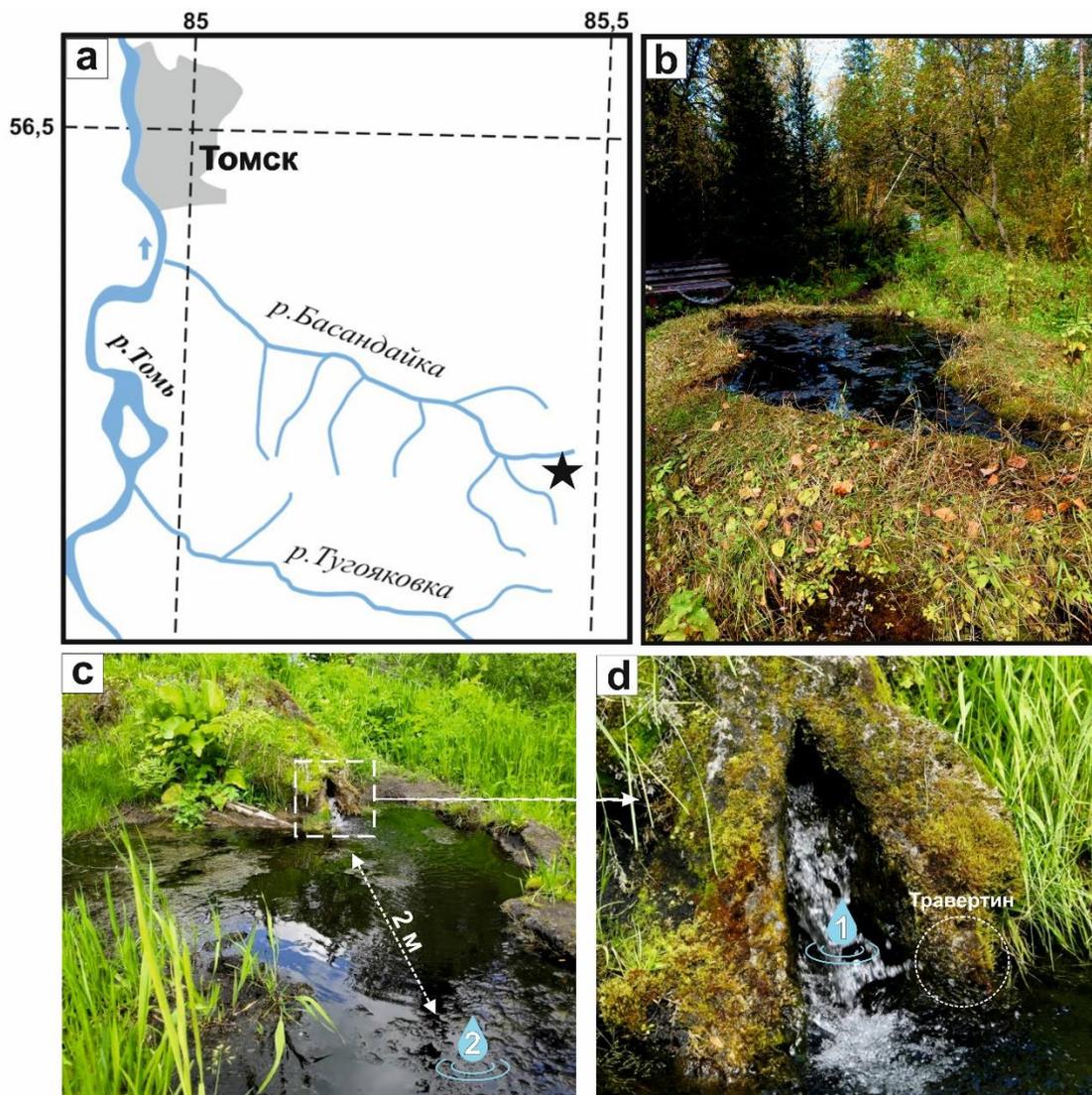


Рис. 1. а – район исследования Таловские чаши; б – объект исследования (чаша Удивительная);
с–d – места отбора проб воды и травертинов

Fig. 1. a – study area Talovskiye chashi; b – study object (chasha Udivitnaya); c–d – sampling location

2. Результаты исследования и их обсуждение

2.1. Морфология и состав травертинов. Строение и морфология изученных нами образцов травертина расширяет ранее полученные характеристики [Баженов, Соколова, 1988; Петрова и др., 2002; Петрова и др., 2003; Уткин, 2003; Шварцев, 2007; Yang et al., 2024; Tang et al., 2025]. По химическому и минеральному составу (табл. 1), согласно проведенным исследованиям, травертины сложены преимущественно кальцитом, его содержание достигает 90–98 %. Среди второстепенных минералов отмечается бернессит $((\text{Na}, \text{Ca})_{0.5}(\text{Mn}^{4+}, \text{Mn}^{3+})_2\text{O}_4 \times 1,5\text{H}_2\text{O})$, содержание которого варьирует до 7 %, и примесь кварца (1–10 %). Установлено, что присутствие бернессита придает

кальцитовому травертину более темную окраску (рис. 2). Таким образом были выделены травертины – кальцитовые и бернессит-кальцитовые. Образец травертина из общего стока родников содержит примесь кварца, бернессита, доломита и глинистых минералов.

Кальцитовые травертины характеризуются микропористой текстурой. Размер пор варьирует до 2–3 мм, их очертания извилисты. Стенки пор сложены тонко- и микрзернистым (пелитоморфным) агрегатом кальцита с зональным строением, где чередуются слои с разной гранулометрией. Часто наблюдаются полные псевдоморфозы кальцита по органическим остаткам (мох). В качестве аксессуарной примеси присутствуют единичные зёрна терригенного кварца и плагиоклаза (см. рис. 3).

Бернессит-кальцитовые травертины отличаются более высокой степенью кристалличности и скорлуповато-натёчной текстурой. Бернессит образует сажистые налёты и корочки (мощностью до 0,5 мм), покрывающие кальцитовые агрегаты (рис. 2). Под микроскопом он фиксируется в виде крустификационных оторочек по контурам растительных реликтов, а

также выполняет поровые пространства. Кристалло-морфологические особенности бернессита включают треугольные и сферолитоподобные агрегаты размером до 0,2 мм. Минерал непрозрачен, имеет чёрный цвет и повышенный рельеф на фоне кальцита; интерференционные цвета не наблюдаются из-за интенсивной собственной окраски (рис. 3).

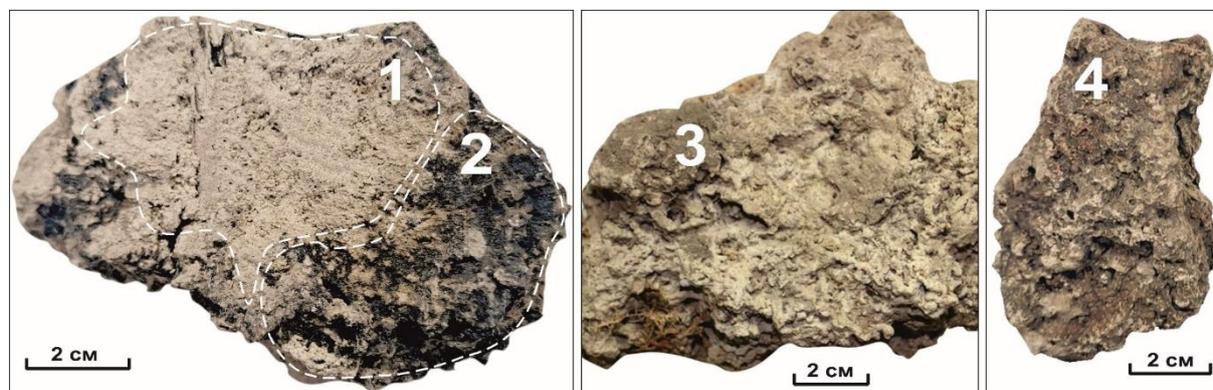


Рис. 2. Образцы травертинов

Цифрами показаны места проб для аналитических исследований: 1 – чаша Удивительная (кальцитовый участок); 2 – чаша Удивительная (участок с бернесситом); 3 – вторая чаша; 4 – общий сток с чаш, в 20 м от истока родников

Fig. 2. Travertine samples

The numbers indicate the locations of samples for analytical studies: 1 – chasha Udivitnaya (calcite part); 2 – chasha Udivitnaya (with birnessite part); 3 – the second chasha; 4 – common flow from the chashas, 20 m from the source of the springs

Таблица 1

Химический и минеральный состав травертинов, %

Table 1

Chemical and mineral composition of travertines, %

№ пр	1	2	3	4
	Чаша Удивительная (кальцитовая)	Чаша Удивительная (с бернесситом)	Вторая чаша	Общий сток с чаш, в 20 м от истока родников
SiO ₂ , %	2,2	2,48	2,63	9,22
Al ₂ O ₃	0,1	0,09	0,33	1,9
Fe ₂ O ₃ общ	0,15	0,2	0,36	2,09
MnO	0,16	10,71	6,61	5,61
MgO	0,53	0,43	0,62	0,6
CaO	53,02	46,61	49,36	46,6
Na ₂ O	0,02	0,04	0,06	0,21
K ₂ O	–	0,03	0,03	0,23
TiO ₂	0,01	0,01	0,02	0,14
P ₂ O ₅	0,05	0,03	0,04	0,13
S	0,06	0,06	0,04	0,04
ППП	43,26	38,95	39,54	32,91
Сумма	99,56	99,64	99,64	99,68

Минеральный состав, об. %

Кальцит	97	90	97	87
Кварц	1	3	1	10
Бернессит	2	7	2	1
Доломит	–	–	–	2
Глинистые минералы	–	–	–	<1

На основе данных растровой электронной микроскопии установлены особенности микростроения травертинов (рис. 4). Кальцитовые разности характеризуются агрегатным строением с развитой пористой текстурой. Агрегаты овальной формы (до 1 мм в поперечнике) содержат поры двух типов: межагрегатные (округлые и щелевидные) и более мелкие внутриагрегатные полости. Размер пор варьирует от 0,15 до 0,2 мм. Стенки пор демонстрируют зональное строение, выраженное в чередовании слоёв мелкозернистого и микрозернистого (пелитоморфного) кальцита. Агрегаты сложены субпараллельно ориентированными пластинчатыми микрокристаллами кальцита, формирующими плотную структуру с видимыми ступенчатыми гранями роста.

Бернессит-кальцитовые разности отличаются почковидным строением, обусловленным присутствием бернессита. РЭМ-исследования выявили, что бернессит образует изолированные глобулярные скопления размером до 300 мкм, контрастирующие с ровными поверхностями кальцитовой массы. При увеличении

установлено, что данные агрегаты состоят из сферoidalных частиц (диаметром до 30 мкм), сросшихся между собой. Такая морфология указывает на коллоидно-химический механизм осаждения марганцевой фазы и её пространственное обособление от карбонатного матрикса.

2.2. Геохимическая характеристика травертинов и воды.

Травертины. Геохимические особенности микроэлементов в изученных травертинах демонстрируют различия травертинов из чаш и общего стока вдали от родников (табл. 2, рис. 5). Травертины характеризуются ниже кларковых для карбонатных пород концентрациями большинства микроэлементов. Образец травертина из стока с чаш имеет близкларковое содержание для большинства элементов и вышекларковое для Sc, Cr, Mn, Co, Cu, Nb, Mo, Cs, Sr, Ba (рис. 5).

Кальцитовый или бернессит-кальцитовый травертины в целом демонстрируют схожие уровни накопления элементов, отличаются лишь V, Zn, Zr, Ta, W, Pb, Th и U, отражая различия в условиях осаждения и механизмах концентрирования.

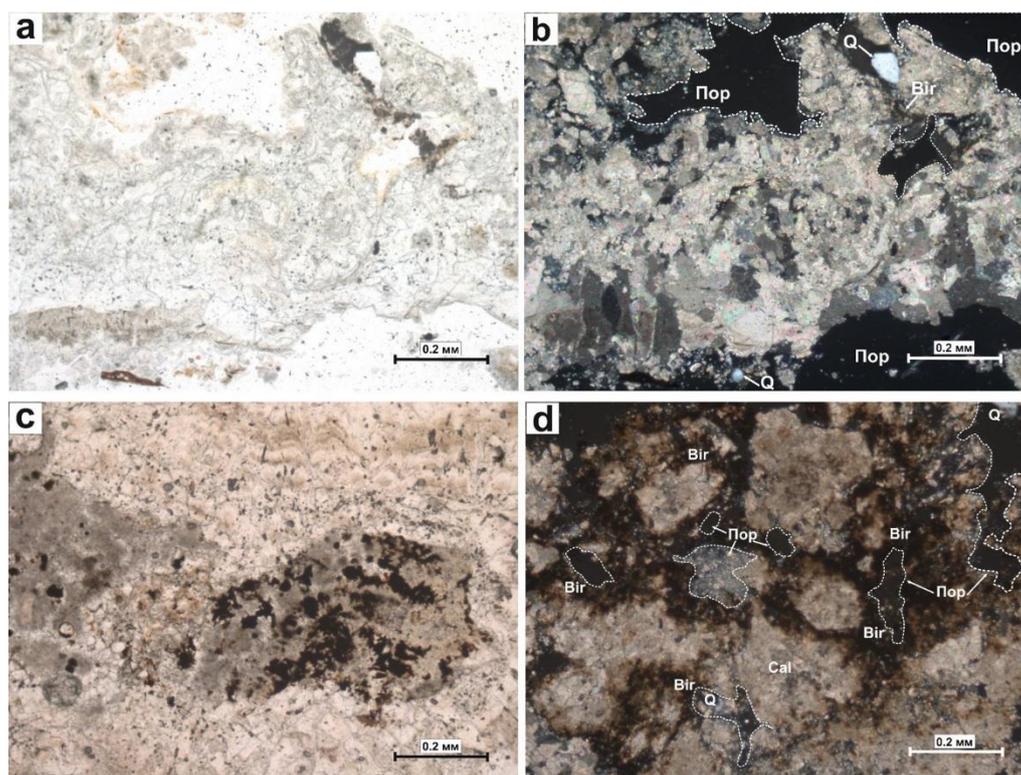


Рис. 3. Особенности строения кальцитового и бернессит-кальцитового участков травертина

Микропористый кальцитовый травертин с терригенной примесью кварца: а – николи II; б – николи +. Слоистая микротекстура и взаимоотношения кальцита и бернессита: с – николи II, д – николи +. Условные обозначения: Bir – бернессит, Q – кварц, Cal – кальцит, Пор – поры

Fig. 3. Structural features of the calcite and birnessite-calcite sections of travertine

Microporous calcitic travertine with a terrigenous quartz admixture: а – parallel Nicols; б – crossed Nicols; Laminar microtexture and relationships between calcite and birnessite: с – parallel Nicols, д – crossed Nicols. Legend: Bir – birnessite, Q – quartz, Cal – calcite, Пор – pores

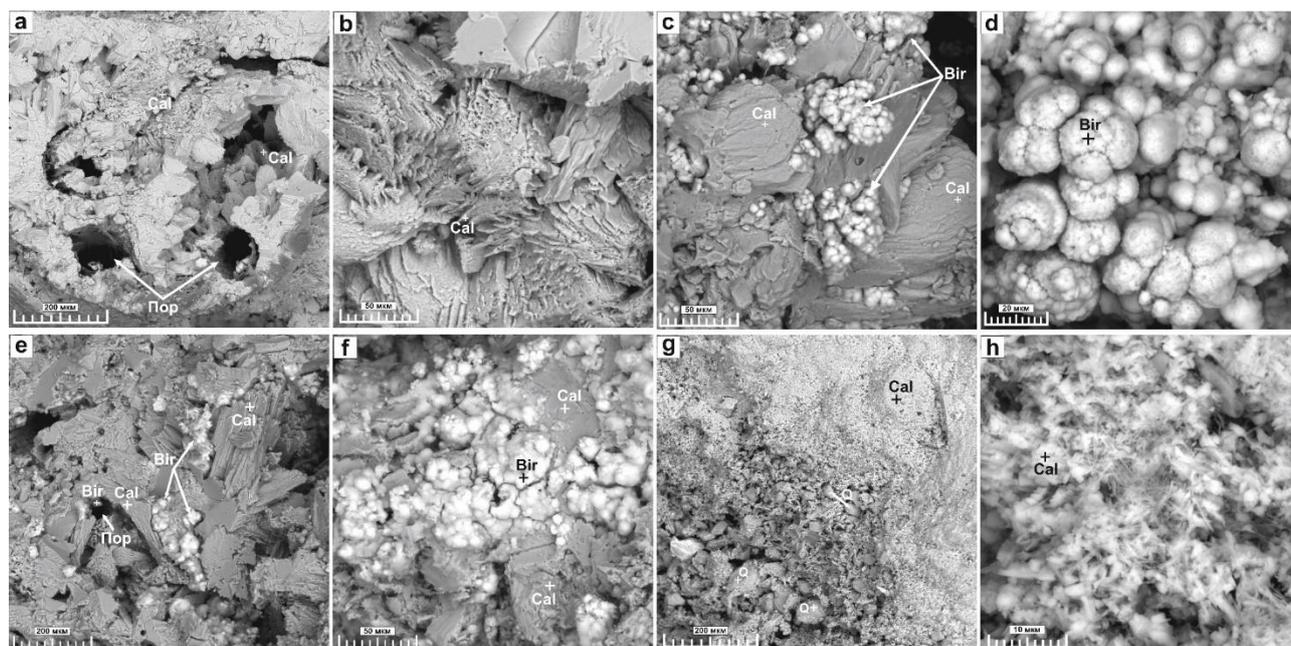


Рис. 4. Микростроение и состав травертинов. Режим BSE

a, b – чаша Удивительная (кальцитовая); c, d – чаша Удивительная (с бернесситом); e, f – вторая чаша; g, h – общий сток с чаш, в 20 м от истока родников. Условные обозначения: Bir – бернессит, Cal – кальцит, Пор – поры

Fig. 4. Microstructure and composition of travertines. BSE mode

a, b – chasha Udivitnaya (calcite); c, d – chasha Udivitnaya (with birnessite); e, f – second chasha; g, h – total flow from the chasha s, 20 m from the spring source. Legend: Bir – birnessite, Cal – calcite, Пор – pores

Известно, что такие элементы, как Sr и Ba, могут изоморфно замещать Ca^{2+} в решетках кальцита [Макрыгина, 2011; Кох и др., 2015; Koralay, İmge, 2025]. Вследствие чего мы видим их более высокое содержание в преимущественно кальцитовых разностях. Марганец в травертинах выделяется в виде собственного минерала – бернессита. Его образование происходит из холодных слабоминерализованных вод в нейтральных или слабощелочных условиях на окислительном барьере [Баженов, Соколова, 1988; Коçак, 2010; Кох и др., 2015].

Проба 4, отобранная в 20 м от истока, аккумулирует материал со всей площади дренирования. Об этом свидетельствуют максимальные содержания типично литофильных и терригенных элементов: Ti (800 мг/кг), Zr (24,5 мг/кг), Nb (2,25 мг/кг), Hf, Ta, а также Al и K. Эти элементы входят в состав устойчивых аксессуарных и тяжелых минералов, привносимых водным потоком. Поэтому повышенные содержания Sc, Cr, Nb, Cs в этой пробе в первую очередь связаны с увеличением доли кластической (аллотигенной) компоненты в осадке [Gromet et al., 1984; Тейлор, МакЛеннан, 1988; Макрыгина, 2011; Nordstrom, 2011].

Бернессит обладают исключительно высокой сорбционной емкостью. В окислительных условиях

ручьевого стока они активно осаждаются и селективно сорбируют из воды катионы трех- и четырехвалентных элементов Co, Cu, Ni, Zn, Pb и Mo [Баженов, Соколова, 1988; Коçак, 2020].

Поведение U чувствительно к редокс-условиям: в окислительных водах уран мигрирует и при осаждении карбонатов или на поверхности Fe-Mn-оксидов U(VI) может сорбироваться. Высокие концентрации ряда редких и рассеянных элементов (Mo, Nb, Cs, Sc, U, As) указывают на то, что питающие травертиновые системы воды являются не просто инфильтрационными, а глубинными, циркулировавшими по зонам разрывных нарушений и длительно взаимодействовавшими с горными породами [Дубинин, 2006; Шварцев и др., 2007].

В подземных водах концентрации ряда макро- и микроэлементов (Na, Mg, Ca, Sc, V, Mn, Fe, Co, Ni, Se, Sr, Ba, U) превышают средние кларковые значения речных вод содержания (рис. 5, a). Ca, Mg, Sr, Ba, Na, U – элементы, связанные с растворением карбонатных и алюмосиликатных минералов [Шварцев и др., 2007; Гудымович и др., 2009; Колубаева и др., 2010; Макрыгина, 2011; Колубаева, 2012]. Высокие концентрации Mn (до 2,6 мг/л) и Fe, Co, Ni связывают с их мобилизацией в восстановительных условиях в глубинных частях водоносного горизонта, где происходит

растворение породообразующих минералов, а также, возможно, сульфидов. При последующем выходе воды на поверхность и окислении эти элементы ак-

тивно соосажаются, формируя бернессит-содержащие травертины [Баженов, Соколова, 1988; Шварцев и др., 2007].

Таблица 2

Содержание микроэлементов в изученных травертине и воде

Таблица 2

Content of trace elements in travertine and water

№ пр	Травертины, мг/кг				Вода, мг/л					
	1	2	3	4	1	2	3	4	5	6
Li	3,404	2,837	1,048	4,757	0,0114	0,0135	0,0094	0,0112	0,012	0,0125
Be	0,029	0,003	0,016	0,242	0,00001	0,00001	0,00002	0,00001	0,00002	–
Na	–	–	–	–	13,89	12,78	9,72	13,26	14,18	4,31
Mg	–	–	–	–	29,42	24,95	18,91	28,22	28,05	8,33
Al	–	–	–	–	0,059	0,096	0,115	0,021	0,024	0,02
K	–	–	–	–	0,835	0,845	1,13	0,782	0,794	–
Sc	0,373	0,714	0,556	2,983	0,0069	0,0061	0,0055	0,0068	0,0066	–
Ti	19,08	17,196	57,376	800,063	0,0041	0,0026	0,0058	0,003	0,0029	0,0004
V	4,48	0,094	0,764	19,074	0,016	0,0095	0,01	0,0113	0,009	0,0095
Cr	7,379	4,95	4,021	23,213	0,0089	0,0069	0,0078	0,0082	0,0083	0,0005
Fe	–	–	–	–	0,115	0,091	0,137	0,11	0,097	0,1
Mn	1287,16	1857,336	1283,106	3595,235	2,279	1,029	0,234	2,633	0,145	1,302
Co	4,341	3,068	4,481	15,324	0,0021	0,0008	0,0005	0,0029	0,0008	0,0004
Ni	0,663	0,692	0,96	5,973	0,0016	0,0011	0,0013	0,0022	0,0013	0,0009
Cu	3,866	11,627	3,425	7,964	0,0018	0,0007	0,0012	0,0009	0,0006	–
Zn	1,717	7,798	9,293	15,816	0,0035	0,0038	0,0027	0,0045	0,0029	–
Ga	1,816	1,734	0,577	5,219	0,0002	0,0001	–	0,0003	0,0001	–
Se	–	–	–	–	0,0252	0,0171	0,0104	0,0176	0,0134	0,0139
Rb	0,211	0,362	0,752	11,214	0,0013	0,0044	0,0014	0,0007	0,0006	–
Sr	592,474	366,748	622,951	513,225	0,742	0,594	0,486	0,704	0,708	0,716
Y	0,209	0,118	0,405	5,694	0,00004	0,00001	0,00004	0,00003	0,00002	–
Zr	1,451	0,757	2,652	24,489	–	–	–	–	–	–
Nb	0,076	0,066	0,201	2,249	–	–	–	–	–	–
Mo	0,845	0,853	0,755	10,709	0,00301	0,00152	0,00102	0,00237	0,00192	0,00001
Cd	–	–	–	–	0,00003	0,0001	0,00001	0,00007	0,00001	–
Sn	–	–	–	–	0,00066	0,00048	0,0008	0,00059	0,0005	0,00001
Sb	–	–	–	–	0,00007	0,00009	0,00014	0,00006	0,00004	–
Cs	0,035	0,01	0,029	0,552	0,00003	0,00004	0,00003	0,00001	0,00001	–
Ba	67,867	57,733	25,727	214,635	0,041	0,022	0,065	0,044	0,038	0,052
Hf	0,017	0,012	0,054	0,531	–	–	–	–	–	–
Ta	0,008	0,001	0,014	0,164	–	–	–	–	–	–
W	0,368	0,031	0,071	0,26	–	–	–	–	–	–
Tl	0,012	0,001	0,007	0,013	–	–	–	–	–	–
Pb	0,423	2,496	2,161	4,347	0,00051	0,00038	0,00043	0,00048	0,00041	0,00004
Th	0,031	0,067	0,113	1,538	–	–	0,00002	–	0,00001	–
U	3,338	0,828	3,502	4,419	0,0022	0,0022	0,00093	0,00229	0,00195	0,00016

Примечание. Здесь и в табл. 3: 1 – чаша Удивительная; 2 – чаша Удивительная (с бернесситом); 3 – вторая чаша; 4 – общий сток с чаш, в 20 м от истока родников.

Note. Here and in the table 3: 1 – chasha Udivitel'naya; 2 – chasha Udivitel'naya (with birnessite); 3 – the second chasha; 4 – common flow from the chashas, 20 m from the source of the springs.

Примечание. Здесь и в табл. 3: 1 – чаша Удивительная; 2 – 2 метра от чаши Удивительная; 3 – 5 метров от чаши Удивительная; 4 – вторая чаша; 5 – третья чаша; 6 – общий сток с чаш, в 20 м от истока родников.

Note. Here and in the table 3: 1 – chasha Udivitel'naya; 2 – 2 meters from chasha Udivitel'naya; 3 – 5 meters from chasha Udivitel'naya; 4 – the second chasha; 5 – the third chasha; 6 common flow from the chashas, 20 m from the source of the springs.

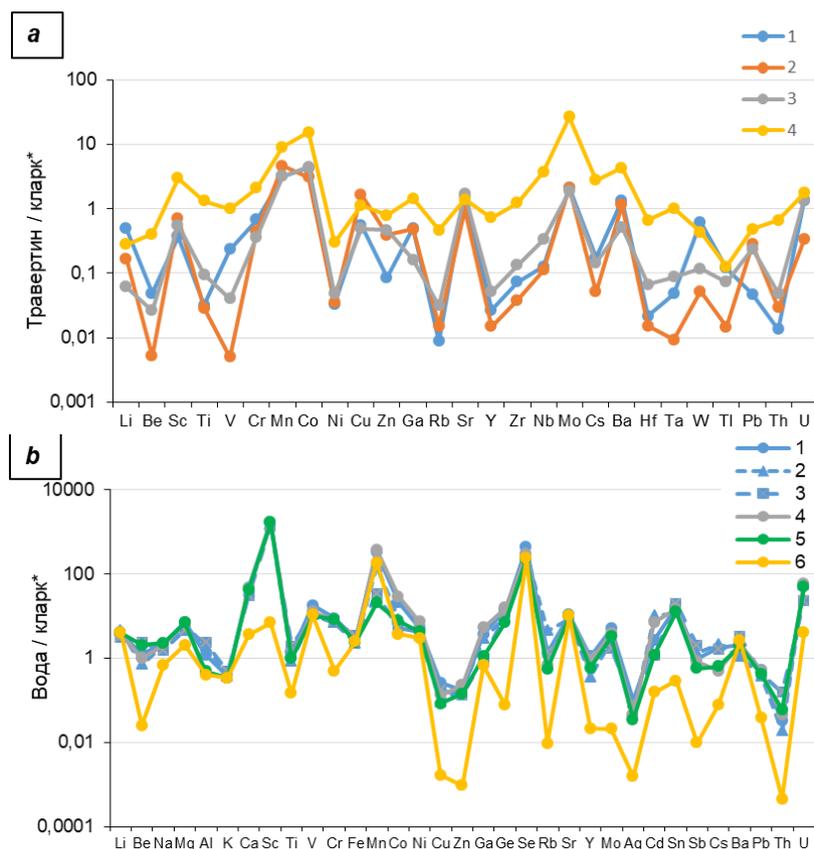


Рис. 5. Распределение микроэлементов в травертине, нормированное по кларку осадочных карбонатных пород (а), и в воде, нормированное по кларку речной воды (б)

Травертины: 1 – чаша Удивительная (кальцитовая часть); 2 – чаша Удивительная (с бернесситом); 3 – вторая чаша; 4 – общий сток с чаш, в 20 м от истока родников; Вода: 1 – чаша Удивительная; 2 – 2 м от чаши Удивительная; 3 – 5 м от чаши Удивительная; 4 – вторая чаша; 5 – третья чаша; 6 – общий сток с чаш, в 20 м от истока родников

Fig. 5. Distribution of trace elements in travertine, normalized by the clark of sedimentary carbonate rocks (a) and in water, normalized by the clark of river water (b)

Note: Travertines: 1 – chasha Udivitelnaya (calcite part); 2 – chasha Udivitelnaya (with birnessite); 3 – the second chasha; 4 – common flow from the chashas, 20 m from the source of the springs; Water: 1 – chasha spring, Udivitelnaya; 2 – 2 meters from chasha Udivitelnaya; 3 – 5 meters from chasha Udivitelnaya; 4 – the second chasha; 5 – the third chasha; 6 – common flow from the chashas, 20 m from the source of the springs

Селен в подземных водах часто ассоциируется с сульфидными минералами или замещает серу в сульфатах, и его повышенное содержание может быть связано с окислением сульфидов в зоне гипергенеза [Макрыгина, 2011; Колубаева, 2013].

Скандий и ванадий являются литофильными элементами, концентрирующимися в темноцветных минералах (пироксены, амфиболы, слюды) и аксессуориях (ильменит, магнетит). Их поступление в воду связывают с интенсивным химическим выветриванием коренных палеозойских пород фундамента и продуктов их разрушения в мезокайнозойском чехле [Копылова и др., 1971; Минерагения..., 2001; Макрыгина, 2011].

2.3. Редкоземельные элементы в подземных водах и травертине. Содержание РЗЭ в травертинах ($\Sigma\text{REE} = 0,45\text{--}15,15$ мг/кг) значительно выше, чем в питающих водах ($\Sigma\text{REE} = 0,006\text{--}0,23$ мкг/л) (табл. 3).

Это указывает на эффективное концентрирование РЗЭ карбонатными осадками (на 3–4 порядка).

Наибольшая концентрация в травертине наблюдается в пробе 4 (общий сток с чаш), что может свидетельствовать о кумулятивном эффекте и обогащении тонкодисперсной фракцией либо с накоплением терригенной примеси. Для всех травертинов характерен четко выраженный тренд с обогащением легкими РЗЭ (LREE), что демонстрируют высокие отношения $(\text{La}/\text{Yb})_n = 1,36\text{--}3,61$ и $\text{La}/\text{Sm} = 5,90\text{--}8,76$.

Во всех пробах травертина наблюдается слабо отрицательная или близкая к единице цериевая аномалия ($\text{Ce}/\text{Ce}^* = 0,89\text{--}0,92$). Отсутствие выраженного дефицита Се в твердой фазе, в отличие от вод, указывает, что церий не мобилизуется активно в окислительных условиях осаждения карбоната. Европейская

аномалия резко варьирует: в пробах 1 и 2 (чаша Удильная) фиксируется экстремально положительная аномалия ($Eu/Eu^* = 8,17$ и $6,05$), которая в пробах 3 и 4 снижается до $1,28-1,63$. Столь высокая положительная аномалия Eu является надежным индикатором гидротермального влияния и поступления глубинных флюидов, обогащенных Eu^{2+} , в место формирования конкретных травертиновых построек [Дубинин, 2006].

Спектры распределения РЗЭ в травертине и воде резко различны (рис. 6).

В травертинах ярко выражено преобладание легких РЗЭ (LREE): $LREE/HREE \approx 10-15$, доля LREE составляет $90-94\%$.

Это классический признак сорбционного или осаждающего механизма захвата, при котором LREE ($La^{3+}-Nd^{3+}$) с большим ионным радиусом и меньшим зарядом сильнее сорбируются на поверхностях карбонатов и Fe-Mn-гидроксидов, чем HREE [Харитонova и др., 2016; Chelnokov et al., 2020].

В водах картина иная: доля LREE варьирует от 38 до 79%. В водах непосредственно чаш (пробы 1, 4, 6) HREE часто преобладают (доля до 62%). Это говорит о фракционировании в растворе: комплексные соединения HREE (особенно с карбонат-ионами HCO_3^-/CO_3^{2-}) более стабильны и растворимы в нейтрально-слабощелочных водах, чем комплексы LREE.

Таблица 3

Содержание редкоземельных элементов в травертине и воде

Таблица 3

Content of rare earth elements in travertine and water

№пр.	Травертин, мг/кг				Вода, мг/л					
	1	2	3	4	1	2	3	4	5	6
La	0,1	0,149	0,239	3,377	0,000007	0,000008	0,000056	0,000005	0,000002	0,000001
Ce	0,199	0,287	0,473	6,239	0,00001	0,000009	0,000045	0,000007	0,000008	0,000001
Pr	0,022	0,033	0,052	0,684	0,000006		0,000007	0,000004	0,000001	
Nd	0,059	0,105	0,176	2,569	0,000021	0,000032	0,000032	0,000009	0,000044	
Sm	0,016	0,017	0,031	0,572	0,000006	0,000013	0,000013	0,000006		
Eu	0,022	0,022	0,01	0,179	0,000004	0,000006	0,000029	0,000012	0,000008	
Gd	0,008	0,015	0,037	0,399	0,000011	0,000003	0,000007	0,000011	0,000015	
Tb	0,002	0,002	0,004	0,063	0,000004	0,000003	0,000006	0,000001	0,000003	
Dy	0,01	0,01	0,023	0,386	0,000016	0,000005	0,000011	0,000016	0,000016	0,000001
Ho	0,002	0,002	0,006	0,087	0,000003	0,000002	0,000001	0,000002	0,000006	
Er	0,005	0,005	0,016	0,289	0,000009	0,000006	0,000009	0,000009	0,000009	0,000002
Tm	0,001	0,001	0,002	0,034	0,000002	0,000007	0,000005	0,000003	0,000002	
Yb	0,005	0,004	0,016	0,241	0,000003	0,000007	0,000007	0,000016	0,000007	0,000001
Lu	0,001	0,001	0,002	0,03	0,000002	0,000004	0,000003	0,000002	0,000001	
ΣREE	0,452	0,653	1,087	15,149	0,000129	0,000105	0,00023	0,000101	0,000121	0,000005
Ce/La	1,99	1,93	1,98	1,85	1,43	1,13	0,80	1,40	4,00	1,00
LREE	0,42	0,61	0,98	13,62	0,000053	0,000069	0,000182	0,000042	0,000063	0,000002
HREE	0,03	0,04	0,11	1,53	0,000076	0,000036	0,000048	0,000059	0,000058	0,000003
(La/Yb) _n	1,94	3,61	1,45	1,36	0,02	0,11	0,78	0,03	0,03	0,10
La/Sm	6,25	8,76	7,71	5,90	1,17	0,62	4,31	0,83		
Ce/Sm	12,44	16,88	15,26	10,91	1,67	0,69	3,46	1,17		
Yb/Sm	0,31	0,24	0,52	0,42	5,00	0,54	0,54	2,67		
Ce/Ce*	0,92	0,89	0,92	0,89	0,28	0,99	0,47	0,29	1,16	0,88
Eu/Eu*	8,17	6,05	1,28	1,63	2,04	3,39	12,90	6,11	4,47	
Ho/Ho*	1,13	1,13	1,26	1,05	1,01	1,41	0,40	0,67	2,02	

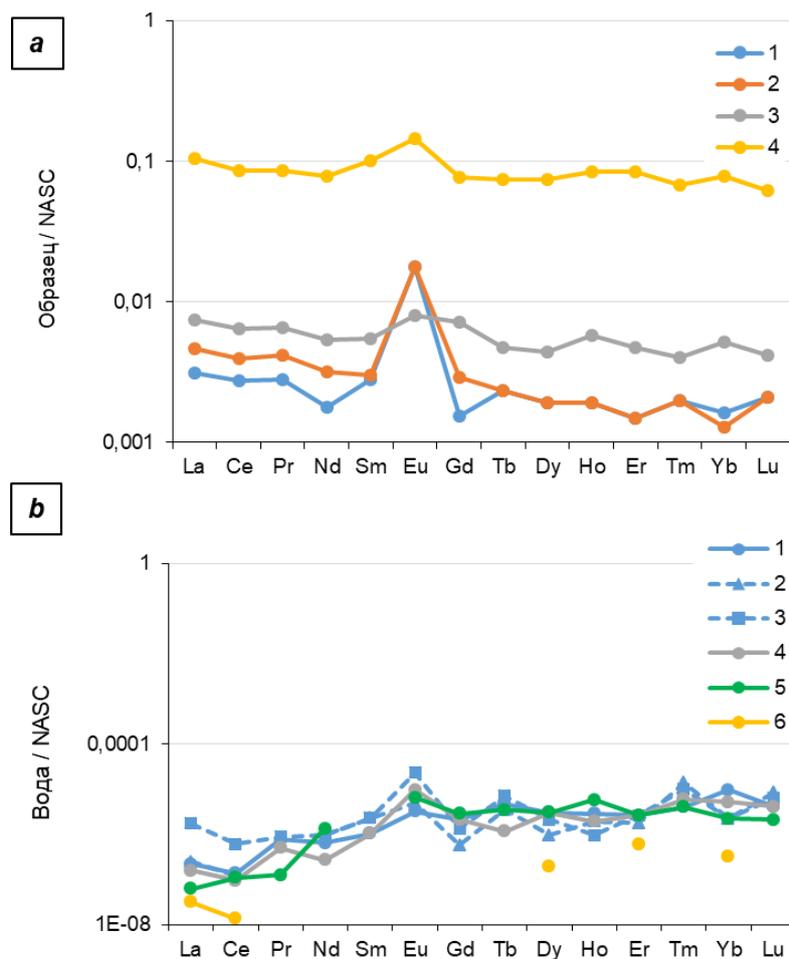


Рис. 6. Спектры распределения редкоземельных элементов в травертине (а) и воде (б)

Травертины: 1 – чаша Удивительная (кальцитовая часть); 2 – чаша Удивительная (с бернесситом); 3 – вторая чаша; 4 – общий сток с чаш, в 20 м от истока родников; Вода: 1 – чаша Удивительная; 2 – 2 м от чаши Удивительная; 3 – 5 м от чаши Удивительная; 4 – вторая чаша; 5 – третья чаша; 6 – общий сток с чаш, в 20 м от истока родников

Fig. 6. Distribution spectra of rare earth elements in travertine (a) and water (b)

Travertines: 1 – chasha Udivitelnaya (calcite part); 2 – chasha Udivitelnaya (with birnessite); 3 – the second chasha; 4 – common flow from the chashas, 20 m from the source of the springs; Water: 1 – chasha spring, Udivitelnaya; 2 – 2 meters from chasha Udivitelnaya; 3 – 5 meters from chasha Udivitelnaya; 4 – the second chasha; 5 – the third chasha; 6 – common flow from the chashas, 20 m from the source of the springs

Поэтому LREE активнее осаждаются, оставляя раствор обогащенным HREE [Шварцев и др., 2007; Chelnokov et al., 2020]. Резко положительные значения в пробах воды у источника (1: $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 2,04$; 2: 3,39; 4: 6,11).

В большинстве проб воды наблюдается дефицит церия ($\text{Ce}/\text{Ce}^* < 1$), особенно сильный в пробах 1 и 4 (0,28 и 0,29). Положительные аномалии Ho/Ho^* и особенности поведения Tm также могут быть связаны со спецификой комплексообразования этих элементов в углекислых водах и указывать на глубинную природу части растворенных компонентов [Дубинин, 2006; Кох и др., 2015; Харитонов и др., 2016; Chelnokov et al., 2020].

В травертинах положительная аномалия европия отмечается во всех пробах, особенно для проб из чаши Удивительная ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 6,08$; 8,17). В восстановительной среде Eu^{3+} переходит в двухвалентное состояние, а ионный радиус образовавшегося Eu^{2+} близок к радиусам Sr^{2+} и Ca^{2+} . Положительную Eu-аномалию часто связывают с восстановительными условиями в питающих подземных водах или в микрizonaх осаждения [Дубинин, 2006].

Относительные пики Ho и Tm: на общем фоне плавного спада от LREE к HREE иногда наблюдаются небольшие подъемы для Ho и Tm. Это может быть связано с их селективной сорбцией на специфических минеральных фазах, присутствующих в травертине, таких

как бернессит. Кроме того, Fe-Mn-гидроксиды и глинистые минералы известны своей способностью к специфическому связыванию средних и тяжелых РЗЭ.

На спектрах воды (см. рис. 5, б) отмечаются небольшие пики Eu, Tb, Ho, Tm. Наличие положительных аномалий тех же элементов (особенно Eu) в воде подтверждает, что их специфическое поведение наследуется от источника вод. Восстановительные условия (для Eu) и особенности комплексообразования (для Tb, Ho, Tm) в глубинной среде определяют их аномальное соотношение еще до выхода на поверхность [Дубинин, 2006; Харитонов и др., 2016].

Заключение

Травертины Таловских чаш имеют кальцитовый и бернессит-кальцитовый состав, их формирование связано с подземными водами, изливающимися на поверхность в областях разгрузки.

Известковые чаши на изученном объекте различаются по размерам, минеральному, макро- и микроэлементному составу, что свидетельствует о сложных, протекающих одновременно процессах переноса,

осаждения и растворения вторичной минеральной фазы и терригенных компонентов.

Аномальные концентрации микроэлементов в травертинах Таловских чаш – не случайность, а прямое следствие глубинной природы питающих флюидов, литологической специфики водоносных комплексов и эффективной работы геохимического барьера в месте их разгрузки. Данные травертины могут рассматриваться как природные «ловушки» и индикаторы гидрогеохимических условий.

Повышенные концентрации многих микроэлементов (U, Mo, Se и др.) и геохимия РЗЭ в изученных нами объектах свидетельствуют о том, что эти воды циркулировали на значительной глубине по разломам, взаимодействуя с коренными породами.

Глубинные трещинные воды, чей химический и микрокомпонентный (включая РЗЭ) состав сформировался при длительном взаимодействии с породами в восстановительных условиях, разгружаясь на поверхность, запускают механизм дифференциации элементов в поверхностных богатых кислородом условиях.

Список источников

- Баженов В.А., Соколова М.Ф.** Бернессит в травертинах Томской области // Вопросы генезиса эндогенных месторождений. Минералогия и геохимия. Л. : Изд-во Ленингр. ун-та, 1988. Вып. 7. С. 157–163.
- Вологодина И.В., Дутова Е.М., Покровский Д.С., Покровский В.Д., Радюк И.В.** Природно-техногенные минеральные новообразования на водах Томской области // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География. 2015. № 3. С. 58–72.
- Геологическая** эволюция и самоорганизация системы вода-порода : В 5 т. Т. 2: Система вода порода в условиях зоны гипергенеза / С.Л. Шварцев [и др.] ; отв. ред. тома Б.Н. Рыженко. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2007. 389 с.
- Геологическое** строение области сопряжения Кузнецкого Алатау и Колывань-Томской складчатой зоны / В.А. Врублевский, М.П. Нагорский, А.Ф. Рубцов, Ю.Ю. Эрвье. Томск : Изд-во Том. ун-та, 1987. 180 с.
- Гудымович С.С., Рычкова И.В., Рябчикова Э.Д.** Геологическое строение окрестностей г. Томска (территории прохождения геологической практики) : учеб. пособие. Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2009. 84 с.
- Деев Е.В., Кох С.Н.** Травертиника Горного Алтая // В сб: Геотектоника и геодинамика сейсмоактивных районов. Материалы II Всероссийской научной конференции, посвященной 300-летию Российской академии наук. М., 2024. С. 13–16.
- Деев Е.В., Сокол Е.В., Ряполова Ю.М. и др.** Четвертичный травертин Курайской зоны разлома (Горный Алтай) // Доклады Академии наук, 2017. № 473 (1). С. 54–59. doi: 10.1134/S1028334X17030023
- Дубинин А.В.** Геохимия редкоземельных элементов в океане. М. : Наука, 2006. 360 с.
- Дутова Е.М.** Геохимия подземных вод и процессы вторичного минералообразования на Северо-Западном Салаире // Известия Томского политехнического университета. 2001. Т. 304, № 1. С. 244–261.
- Колубаева Ю.В.** Равновесно-неравновесное состояние природных вод северной части Колывань-Томской складчатой зоны с ведущими минералами вмещающих горных пород // Вестник Томского государственного университета. 2012. № 364. С. 167–172.
- Колубаева Ю.В.** Формы миграции химических элементов в водах северной части Колывань-Томской складчатой зоны // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2013. Т. 322, № 1. С. 136–144.
- Колубаева Ю.В., Шварцев С.Л., Копылова Ю.Г.** Геохимия вод северной части Колывань-Томской складчатой зоны // Известия вузов. Геология и разведка. 2010. № 2. С. 50–58.
- Копылова Ю.Г., Коробейникова Е.С., Левашов Б.М., Лукин А.А., Паршин П.Н., Рассказов Н.М., Солодовникова Р.С., Удодов П.А., Фатеев А.Д., Шестаков Б.И.** Гидрогеохимические исследования Колывань-Томской складчатой зоны. Томск : Издательство Томского университета, 1971. 283 с.
- Кох С.Н., Новикова С.А., Сокол Э.В., Меленевский В.Н., Маслаков Н.А.** Современная минералообразующая система сопки Обручева (Булганакский грязевулканический очаг, Керченский полуостров) // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2015. № 2 (40). С. 123–146
- Кох С.Н., Сокол Е.В., Деев Е.В. и др.** Современные и палеотравертины Горного Алтая: ориентировочные особенности // Доклады Академии наук. 2018. № 483 (2). С. 180–185. doi: 10.31857/S086956520003477-7
- Кощаков В.Л.** Применение методики геофизического анализа структурных ансамблей закрытых территорий (Колывань-Томская складчатая зона) // Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ]. 2002. Т. 305, вып. 6 : Геология, поиски и разведка полезных ископаемых Сибири. С. 44–66.
- Лепкурова О.Е.** Геохимия подземных вод севера Алтае-Саянского горного обрамления, формирующих травертины : автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Томск, 2005. 21 с.

Макрыгина В.А. Геохимия отдельных элементов : учеб. пособие / отв. ред. В.С. Антипин. Новосибирск : Академическое изд-во «Гео», 2011. 195 с.

Минерагення области сочленения Салаира и Колывань-Томской складчатой зоны / Росляков Н.А., Щербаков Ю.Г., Алабин Л.В. и др. Новосибирск : Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2001. 243 с.

Парначёв В.П., Парначёв С.В. Геология и полезные ископаемые окрестностей города Томска: Материалы к полевой геологической экскурсии : справочное пособие. Томск : Томский государственный университет, 2010. 144 с.

Петрова О.Е., Копылова Ю.Г., Мартынова Т.Е. Геохимические условия травертинообразования (на примере бассейна р. Тугояковка) // Известия ТПУ. 2002. № 6. С. 304–319.

Петрова О.Е., Копылова Ю.Г., Падалко Н.Л., Дутова Е.М. Изотопный состав углерода и кислорода травертиновых родников Колывань-Томской складчатой зоны // Проблемы поисковой и экологической геохимии Сибири : материалы науч. конф., посвященной 100-летию профессора Томского политехнического университета П.А. Удодова. Томск, 25–30 октября 2003 года. Томск : Изд-во ТПУ, 2003. С. 101–104.

Рихванов Л.П., Тайсаев Т.Т., Барановская Н.В., Соктоев Б.Р., Монголина Т.А., Судыко А.Ф., Ильенок С.С. Геохимические особенности травертинов различных регионов и их прогнозные значения // Современные проблемы геохимии : материалы Всерос. совещания (с участием иностранных ученых), посвященного 95-летию со дня рождения академика Л.В. Таусона, 22–26 октября 2012 г., Иркутск. Иркутск : Институт геохимии им. А.П. Виноградова, 2012. Т. 1. С. 233–236.

Тейлор С.Р., МакЛеннан С.М. Континентальная кора: ее состав и эволюция. М. : Мир, 1988. 384 с.

Удодов П.А., Паршин П.Н., Левашов Б.М. и др. Гидрогеохимические исследования Колывань-Томской складчатой зоны. Томск : Изд-во ТГУ, 1971. 283 с.

Уткин Ю. Травертиновые памятники природы Томской области // Экобандероль. 2002. № 22–23. С. 7.

Уткин Ю.В. Томские памятники природы: Тугояковский травертиновый каскад // Проблемы геологии и географии Сибири : материалы науч. конф. Томск, 2003. С. 113–116.

Харитонов Н.А., Вах Е.А., Челноков Г.А., Чудаев О.В., Александров И.А., Брагин И.В. Геохимия редкоземельных элементов в подземных водах Сихотэ-Алинской складчатой области (Дальний восток России) // Тихоокеанская геология. 2016. Т. 35, № 2. С. 68–82.

Шварцев С.Л., Лепокурова О.Е., Копылова Ю.Г. Геохимические механизмы образования травертинов из пресных вод на юге Западной Сибири // Геология и геофизика. 2007. Т. 48, № 8. С. 852–861.

Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. 2-е изд., исправл. и доп. М. : Недра, 1998. 366 с.

Шварцев С.Л. Фундаментальные механизмы взаимодействия в системе вода-горная порода и ее внутренняя геологическая эволюция // Литосфера. 2008. № 6. С. 3–24.

Юшкин Н.П. Травертино-террасовый тип оолитов (Альпы, Швейцария) // Вестник Института геологии Коми УрО РАН. 2009. № 7. С. 8–2.

Capezzuoli E., Gandin A., Pedley M. Decoding tufa and travertine (fresh water carbonates) in the sedimentary record: The state of the art // Sedimentology. 2014. № 61. P. 1–21. doi: 10.1111/sed.12075

Chelnokov G.A., Kharitonova N.A., Bragin I.V. et al. The Geochemistry of Rare Earth Elements in Natural Waters and Secondary Mineral Sediments of Thermal Fields of Kamchatka // Moscow University Geology Bulletin. 2020. V. 75, № 2. P. 196–204.

Dutova E.M. Geochemistry of fresh groundwater in the Altai-Sayan folded area and adjacent areas of the West Siberian plate // Applied Geochemistry. 2020. № 120. P. 104673

Giustini F., Brilli M., Mancini M. Geochemical study of travertines along middle-lower Tiber valley (central Italy): genesis, palaeo-environmental and tectonic implications // Int J Earth Sci (Geol Rundsch). 2018. № 107. P. 1321–1342. doi: 10.1007/s00531-017-1535-0

Goldstein S.J., Jacobsen S.B. Rare earth elements in river waters // Earth Planet. Sci. Lett. 1988. V. 89. P. 35–47.

Gromet R.P., Dymek R.F., Haskin L.A., Korotev R.L. The North American Shale composite: Its compilation, major and trace element characteristics // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1984. № 48. P. 2469–2482. doi: 10.1016/0016-7037(84)90298-9

Koçak I. Sarlıdır manganese mineralization related to travertine, Central Anatolian Volcanic Province, Turkey // Geodinamica Acta. 2020. № 32:1. P. 11–24. doi: 10.1080/09853111.2020.1829904

Koralay T., İmre N. Minerо-petrographic, geochemical, and multiisotopic characterization of the ancientbanded travertine quarries of the Lycus Valley (Denizli, Türkiye) // Turkish Journal of Earth Sciences. 2025. № 34 (2). P. 143–175. doi: 10.55730/1300-0985.1951

Nordstrom D.K. Hydrogeochemical processes governing the origin, transport and fate of major and trace elements from mine wastes and mineralized rock to surface waters // Applied Geochemistry. 2011. № 26. P. 1777–1791. doi: 10.1016/j.apgeochem.2011.06.002

Pentecost A. Travertine. Berlin : Heidelberg, Springer-Verlag, 2005. 446 p.

Pentecost A., Viles H. A review and reassessment of travertine classification // Géographie physique et Quaternaire. 1994. V. 48. P. 305–314.

Tang J., Gao W., Liu X., Zeng Q., Sun D., Tan Y., Jiang H., Zhang Z., Liu S. Research on the mineralogical characteristics and color formation mechanisms of different colored travertine in the Shenxianchi scenic spot: a comprehensive analysis using multi-technique characterization // Carbonates and Evaporites. 2025. № 40. P. 81. doi: 10.1007/s13146-025-01115-y

Yang H., Wu X., Cui H., Wang W., Cheng Y., Gong X., Luo X., Lin Q. Formation Mechanism of Muji Travertine in the Pamirs Plateau, China // Minerals. 2024. № 14. P. 1192. doi: 10.3390/min14121192

References

Bazhenov V.A., Sokolova M.F. *Bernessit v travertinakh Tomskoy oblasti // Voprosy genezisa endogennykh mestorozhdeniy. Mineralogiya i geokhimiya* [Bernessite in travertines of the Tomsk region // Problems of the genesis of endogenous deposits. Mineralogy and geochemistry]. Leningrad: University Press, 1988, Iss. 7. pp. 157–163. In Russian

Vologdina I.V., Dutova, E.M., Pokrovsky D.S., Pokrovsky V.D., Radyuk I.V. Natural and technogenic mineral new growths at water intakes in Tomsk region // Bulletin of St. Petersburg University. Series 7. Geology. Geography. 2015. (3). pp. 58–72. In Russian

Geologicheskaya evolyutsiya i samoorganizatsiya sistemy voda-poroda: v 5 tomakh. T. 2: Sistema voda poroda v usloviyakh zony gipergeneza [Geological evolution and self-organization of the water-rock system: in 5 volumes. Vol. 2: The water-rock system under

conditions of the hypergenesis zone / S.L. Shvartsev [et al.]; volume editor B.N. Ryzhenko; IPGG SB RAS [et al.]. SB RAS Publishing House, 2007. 389 p. In Russian

Geologicheskoye stroyeniye oblasti sopryazheniya Kuznetskogo Alatau i Kolyvan'-Tomskoy skladchatoy zony [Geological structure of the junction area of the Kuznetsk Alatau and Kolyvan-Tomsk folded zone] / V.A. Vrublevsky, M.P. Nagorsky, A.F. Rubtsov, Yu.Yu. Ervie. Tomsk: Tomsk University Press, 1987. 180 p. In Russian

Gudymovich S.S., Rychkova I.V., Ryabchikova E.D. *Geologicheskoye stroyeniye okrestnostey g. Tomsk (territorii prokhozhdeniya geologicheskoy praktiki): uchebnoye posobiye* [Geological structure of the environs of Tomsk (territory of geological internship): a textbook]. Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2009. 84 p. In Russian

Deev E.V., Kokh S.N. *Travitonika Gornogo Altaya* [Travitonika of Gorny Altai] // In the collection: Geotectonics and geodynamics of seismically active regions. Proceedings of the II All-Russian scientific conference dedicated to the 300th anniversary of the Russian Academy of Sciences. Moscow, 2024. pp. 13–16. In Russian

Deev E.V., Sokol E.V., Ryapolova Yu.M., et al. Quaternary travertine of the Kurai fault zone (Gorny Altai) // *Doklady Akademii nauk* [Doklady Earth Sciences]. 2017. 473 (1), pp. 54–59. doi: 10.1134/S1028334X17030023. In Russian

Dubinin, A.V. *Geokhimiya redkozemel'nykh elementov v okeane* [Geochemistry of Rare Earth Elements in the Ocean]. Moscow: Nauka, 2006. 360 p. In Russian

Dutova, E.M. *Geokhimiya podzemnykh vod i protsessy vtorichnogo mineraloobrazovaniya na Severo-Zapadnom Salaire* [Geochemistry of Groundwater and Secondary Mineral Formation Processes in Northwest Salair] // Bulletin of Tomsk Polytechnic University. 2001. V. 304, No. 1. pp. 244–261. In Russian

Kolubaeva, Yu.V. *Ravnovesno-neravnovesnoye sostoyaniye prirodnykh vod severnoy chasti Kolyvan'-Tomskoy skladchatoy zony s vedushchimi mineralami vmeshchayushchikh gornyykh porod* [Equilibrium-Nonequilibrium State of Natural Waters in the Northern Part of the Kolyvan-Tomsk Folded Zone with Leading Minerals of the Enclosing Rocks] // Bulletin of Tomsk State University. 2012. No. 364. pp. 167–172. In Russian

Kolubaeva Yu.V. *Formy migratsii khimicheskikh elementov v vodakh severnoy chasti Kolyvan'-Tomskoy skladchatoy zony* [Migration Forms of Chemical Elements in the Waters of the Northern Kolyvan-Tomsk Folded Zone] // Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering. 2013. V. 322. No. 1. pp. 136–144. In Russian

Kolubaeva Yu.V., Shvartsev S.L., Kopylova Yu.G. *Geokhimiya vod severnoy chasti Kolyvan'-Tomskoy skladchatoy zony* [Geochemistry of Waters of the Northern Kolyvan-Tomsk Folded Zone] // Bulletin of Universities. Geology and Exploration. 2010. No. 2. pp. 50–58. In Russian

Kolubaeva Yu.V., Shvartsev S.L., Kopylova Yu.G. *Gidrogeokhimicheskiye issledovaniya Kolyvan'-Tomskoy skladchatoy zony* [Geochemistry of Waters of the Northern Kolyvan-Tomsk Folded Zone] // Bulletin of Universities. Geology and exploration. 2010. No. 2. pp. 50–58. In Russian

Kopylova Yu.G., Korobeynikova E.S., Levashov B.M., Lukin A.A., Parshin P.N., Rasskazov N.M., Solodovnikova R.S., Udodov P.A., Fateev A.D., Shestakov B.I. *Gidrogeokhimicheskiye issledovaniya Kolyvan'-Tomskoy skladchatoy zony* [Hydrogeochemical studies of the Kolyvan-Tomsk folded zone]. Tomsk: Tomsk University Publishing House, Tomsk, 1971. 283 p. In Russian

Kokh S.N., Novikova S.A., Sokol E.V., Melenevsky V.N., Maslakov N.A. *Sovremennaya mineraloobrazuyushchaya sistema sopki Obrucheveva (Bulganakskiy gryazevulkanicheskiy ochag, Kerchenskiy poluostrov)* [Modern mineral-forming system of the Obruchev Hill (Bulganak mud volcanic center, Kerch Peninsula)] // Geology and minerals of the World Ocean. 2015. 2 (40). pp. 123–146. In Russian

Kokh S.N., Sokol E.V., Deev E.V., et al. *Sovremennyye i paleotravertiny Gornogo Altaya: oriyentirovochnyye osobennosti* [Modern and paleotravertines of the Altai Mountains: indicative features] // *Doklady Akademii nauk* [Doklady Earth Sciences], 2018. 483(2). pp. 180–185. In Russian. doi: 10.1134/S1028334X18110107

Koshkarev V.L. *Primeneniye metodiki geofizicheskogo analiza strukturnykh ansambley zakrytykh territoriy (Kolyvan'-Tomskaya skladchataya zona)* [Application of the methodology of geophysical analysis of structural ensembles of closed territories (Kolyvan-Tomsk folded zone)] // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University [Izvestiya TPU]. 2002. V. 305, Iss.6: Geology, prospecting and exploration of minerals in Siberia. pp. 44–66. In Russian

Lepokurova O.E. *Geokhimiya podzemnykh vod severa Altaye-Sayanskogo gornogo obramleniya, formiruyushchikh travertiny* [Geochemistry of groundwater in the northern Altai-Sayan mountain range, forming travertines]: Abstract of Candidate of Geological and Mineralogical Sciences Dissertation: 25.00.07 / Tomsk Polytechnic University, 2005. 21 p. In Russian

Minerageniya oblasti sochleneniya Salaira i Kolyvan'-Tomskoy skladchatoy zony [Minerageny of the Salair and Kolyvan-Tomsk Folded Zone Junction Area] / Roslyakov N.A., Shcherbakov Yu.G., Alabin L.V. et al. Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Geo Branch. 2001. 243 p. In Russian

Makrygina V.A. *Geokhimiya ot del'nykh elementov: uchebnoye posobiye* [Geochemistry of Individual Elements: A Textbook]. Ed. V.S. Antipin. SB RAS, A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry; Irkutsk State University; Baikal Geochemistry Research and Educational Center. Novosibirsk: Geo Academic Publishing House, 2011. 195 p.

Parnachev V.P., Parnachev S.V. *Geologiya i poleznye iskopayemye okrestnostey goroda Tomsk: Materialy k polevoy geologicheskoy ekskursii: Spravochnoye posobiye* [Geology and Mineral Resources of the Tomsk Region: Materials for a Geological Field Excursion: Reference Guide]. Tomsk: Tomsk State University, 2010. 144 p. In Russian

Petrova O.E., Kopylova Yu.G., Martynova T.E. *Geokhimicheskiye usloviya travertinoobrazovaniya (na primere basseyna r. Tugoyakovka)* [Geochemical conditions of travertine formation (using the Tugoyakovka River basin as an example)] // *Izvestiya TPU*. 2002. No. 6. pp. 304–319. In Russian

Petrova O.E., Kopylova Yu.G., Padalko N.L., Dutova E.M. *Izotopnyy sostav ugleroda i kisloroda travertinovyykh rodnikov Kolyvan'-Tomskoy skladchatoy zony* [Isotopic composition of carbon and oxygen in travertine springs of the Kolyvan-Tomsk folded zone] // Proceedings of scientific conference devoted to 100-year-anniversary of P.A. Udodov, Professor of the Tomsk Polytechnic University, Tomsk, October 25–30, 2003. Tomsk Polytechnic University. Tomsk: Publishing house TPU. 2003. pp. 101–104. In Russian

Rikhvanov L.P., Taisaev T.T., Baranovskaya N.V., Soktoev B.R., Mongolina T.A., Sudyko A.F., Ilyenok S.S. *Geokhimicheskiye osobennosti travertinov razlichnykh regionov i ikh prognoznnoye znachenie* [Geochemical Features of Travertines from Different Regions and Their Prognostic Value] // Modern Problems of Geochemistry: Proceedings of the All-Russian Conference (with the Participation of

- Foreign Scientists) Dedicated to the 95th Anniversary of Academician L. V. Tauson, October 22–26, 2012, Irkutsk / Russian Academy of Sciences (RAS), Siberian Branch, A. P. Vinogradov Institute of Geochemistry. 2012. Vol. 1. pp. 233–236. In Russian
- Taylor S. R., McLennan S. M. *Kontinental'naya kora: eye sostav i evolyutsiya* [Continental Crust: Its Composition and Evolution]. Moscow: Mir. 1988. 384 p. In Russian
- Udodov P.A., Parshin P.N., Levashov B.M. and others. *Gidrogeokhimicheskiye issledovaniya Kolyvan'-Tomskoy skladchatoy zony* [Hydrogeochemical studies of the Kolyvan-Tomsk folded zone]. Tomsk: TSU Publishing House. 1971. 283 p. In Russian
- Utkin Yu. *Travertinovyye pamyatniki prirody Tomskoy oblasti* [Travertine natural monuments of the Tomsk region] // *Ecobandol*. 2002. No. 22–23. p. 7. In Russian
- Utkin Yu.V. *Tomskkiye pamyatniki prirody: Tugoyakovskiy travertinovyy kaskad* [Tomsk natural monuments: Tugoyakovsky travertine cascade] // *Problems of geology and geography of Siberia: materials of a scientific conference*. Tomsk. 2003. pp. 113–116. In Russian
- Kharitonova N.A., Vakh E.A., Chelnokov G.A., Chudaev O.V., Aleksandrov I.A., Bragin I.V. *Geochemistry of Rare Earth Elements in Groundwater of the Sikhote-Alin Folded Region (Russian Far East)* // *Tikhookeanskaya geologiya* [Russian Journal of Pacific Geology]. 2016. V. 35. No. 2. pp. 68–82. In Russian
- Shvartsev S.L., Lepokurova O.E., Kopylova Yu.G. *Geochemical Mechanisms of Travertine Formation from Freshwater in the South of Western Siberia* // *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics], 2007, V. 48, No. 8, pp. 852–861. In Russian
- Shvartsev S.L. *Gidrogeokhimiya zony gipergeneza* [Hydrogeochemistry of the Hypergenesis Zone]. 2nd ed., corrected and augmented. Moscow: Nedra, 1998. 366 p. In Russian
- Shvartsev S.L. *Fundamental'nyye mekhanizmy vzaimodeystviya v sisteme voda-gornaya poroda i eye vnutrennyaya geologicheskaya evolyutsiya* [Fundamental mechanisms of interaction in the water-rock system and its internal geological evolution] // *Lithosphere*. 2008. No. 6. pp. 3–24. In Russian
- Yushkin N.P. *Travertino-terrasovyy tip oolitov (Al'py, Shveysariya)* [Travertine-terrace type of oolites (Alps, Switzerland)] // *Bulletin of the Institute of Geology of the Komi Republic, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*, 2009. No. 7. pp. 8–2. In Russian
- Capezzuoli E., Gandin A., Pedley M. *Decoding tufa and travertine (fresh water carbonates) in the sedimentary record: The state of the art*. *Sedimentology*. 2014. 61: 1–21. : 10.1111/sed.12075
- Chelnokov G.A., Kharitonova N.A., Bragin I.V. et al. *The Geochemistry of Rare Earth Elements in Natural Waters and Secondary Mineral Sediments of Thermal Fields of Kamchatka* // *Moscow University Geology Bulletin*. 2020. V. 75, No. 2. pp. 196–204.
- Giustini F., Brilli M., Mancini M. *Geochemical study of travertines along middle-lower Tiber valley (central Italy): genesis, palaeo-environmental and tectonic implications* // *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)*. 2018. V. 107. pp. 1321–1342. doi: 10.1007/s00531-017-1535-0
- Goldstein S.J., Jacobsen S.B. *Rare earth elements in river waters* // *Earth Planet. Sci. Lett*. 1988. V. 89. pp. 35–47.
- Gromet R.P., Dymek R.F., Haskin L.A., Korotev R.L. *The North American Shale composite: Its compilation, major and trace element characteristics* // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1984. V. 48. pp. 2469–2482. doi: 10.1016/0016-7037(84)90298-9
- Koçak I. *Sarıhıdır manganese mineralization related to travertine, Central Anatolian Volcanic Province, Turkey* // *Geodinamica Acta*. 2020. V. 32:1. pp. 11–24. doi: 10.1080/09853111.2020.1829904
- Koralay T., İmre N. *Minero-petrographic, geochemical, and multiisotopic characterization of the ancient banded travertine quarries of the Lycus Valley (Denizli, Türkiye)* // *Turkish Journal of Earth Sciences*. 2025. V. 34 (2). pp. 143–175. doi: 10.55730/1300-0985.1951
- Nordstrom D.K. *Hydrogeochemical processes governing the origin, transport and fate of major and trace elements from mine wastes and mineralized rock to surface waters* // *Applied Geochemistry*. 2011. V. 26. pp. 1777–1791. doi: 10.1016/j.apgeochem.2011.06.002
- Pentecost A. *Travertine*. Springer-Verlag, Berlin: Heidelberg. 2005. 446 p.
- Pentecost A., Viles H. *A review and reassessment of travertine classification* // *Géographie physique et Quaternaire*. 1994. V. 48. pp. 305–314.
- Tang J., Gao W., Liu X., Zeng Q., Sun D., Tan Y., Jiang H., Zhang Z., Liu S. *Research on the mineralogical characteristics and color formation mechanisms of different colored travertine in the Shenxianchi scenic spot: a comprehensive analysis using multi-technique characterization* // *Carbonates and Evaporites*. 2025. V. 40. p. 81. doi: 10.1007/s13146-025-01115-y
- Yang H., Wu X., Cui H., Wang W., Cheng Y., Gong X., Luo X., Lin Q. *Formation Mechanism of Muji Travertine in the Pamirs Plateau, China* // *Minerals*. 2024. V. 14. p. 1192. doi: 10.3390/min14121192

Информация об авторах:

Садиров М.Ш., аспирант, кафедра петрографии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: sadirovmuhriddin02@gmail.com

Володина И.В., кандидат геолого-минералогических наук, доцент, кафедра петрографии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: ivv@mail.tsu.ru

Дутова Е.М., доктор геолого-минералогических наук, профессор, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия; профессор, ИШПР, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия.

E-mail: dutova@tpu.ru

Асочакова Е.М., кандидат геолого-минералогических наук, доцент, кафедра минералогии и геохимии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: ev.asochakova@gmail.com

Тишин П.А., кандидат геолого-минералогических наук, доцент, кафедра петрографии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: tishin_pa@mail.ru

Туробов Э.Ш., ассистент, кафедра геологии и гидрометеорологии, Самаркандский государственный университет им. Шарофа Рашидова, Самарканд, Узбекистан.

E-mail: turobovelder@gmail.com

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

Information about the authors:

Sadirov M.Sh., graduate student, Department of Petrography, Geology and Geography Faculty, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: sadirovmuhriddin02@gmail.com

Vologdina I.V., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Associate Professor, Department of Petrography, Geology and Geography Faculty, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: ivv@mail.tsu.ru

Dutova E.M., Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Professor, Geology and Geography Faculty, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia; Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia.

E-mail: dutova@tpu.ru

Asochakova E.M., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Associate Professor, Department of Mineralogy and Geochemistry, Geology and Geography Faculty, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: ev.asochakova@gmail.com

Tishin P.A., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Associate Professor, Department of Petrography, Geology and Geography Faculty, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: tishin_pa@mail.ru

Turobov E.Sh., Assistant, Department of Geology and Hydrometeorology, Samarkand State University named after Sharof Rashidov, Samarkand, Uzbekistan

E-mail: turobovoldor@gmail.com

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests

Статья поступила в редакцию 13.09.2025; одобрена после рецензирования 03.11.2025; принята к публикации 30.11.2025

The article was submitted 13.09.2025; approved after reviewing 03.11.2025; accepted for publication 30.11.2025