

УДК 549.01:549.766

DOI: 10.24930/2500-302X-2026-26-1-229-240

Солевое выветривание строительных материалов мавзолея Хусейн-бека (Чишминский район, Республика Башкортостан)

С. С. Потапов¹, О. Я. Червяцова², Л. Ю. Кузьмина³, С. А. Садыков¹

¹Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, Институт минералогии, 456317, Челябинская обл., г. Миасс, e-mail: s.potapov-60@yandex.ru

²Государственный природный биосферный заповедник “Шульган-Таш”, 453585, Республика Башкортостан, Бузьянский район, г. Иргызы, ул. Заповедная, 14, e-mail: kittaryu@yandex.ru

³Уфимский федеральный исследовательский центр РАН, Уфимский Институт биологии, 450054, Республика Башкортостан, г. Уфа, пр-т Октября, 69, e-mail: lky_kapova2020@mail.ru

Поступила в редакцию 01.04.2025 г., принята к печати 11.06.2025 г.

Объект исследования. Продукты солевого выветривания на цементе строительных блоков известняка мавзолея Хусейн-бека, расположенного в Чишминском районе Республики Башкортостан. **Материалы и методы.** Методами рентгенофазового, электронно-микроскопического, энерго-дисперсионного и масс-спектрометрического анализов изучен состав минералов из выцветов. **Результаты.** Установлено, что продукты солевого выветривания представлены следующими минералами: гипсом $\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$, хамберстонитом $\text{K}_3\text{Na}_7\text{Mg}_2(\text{SO}_4)_6(\text{NO}_3)_2 \times 6\text{H}_2\text{O}$, дарапскитом $\text{Na}_3(\text{SO}_4)(\text{NO}_3) \times \text{H}_2\text{O}$, сингенитом $\text{K}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2 \times \text{H}_2\text{O}$, эпсомитом $\text{MgSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$, кизеритом $\text{MgSO}_4 \times \text{H}_2\text{O}$, глауберитом $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2$, доломитом $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ и целестином SrSO_4 . Изотопный состав серы $\delta^{34}\text{S}$ минералов из высолов варьирует в пределах +7.28 ... +11.38‰ V-CDT. Пробы с хамберстонитом и дарапскитом характеризуются облегченным составом серы, что, по-видимому, связано с биотическим воздействием гуано птиц. **Выводы.** Основным механизмом деструкции строительного камня, выявленным в мавзолее Хусейн-бека, является солевая коррозия цемента за счет кристаллизации аутигенных минералов. Солевая коррозия мавзолея Хусейн-бека предположительно имеет орнитогенную природу за счет жизнедеятельности птиц, преимущественно полевых воробьев (*Passer montanus*).

Ключевые слова: солевое выветривание, сульфаты, нитраты, минеральный состав, изотопия серы, строительный камень, мавзолей Хусейн-бека, Республика Башкортостан

Источник финансирования

Исследование выполнено по теме “Природные системы в условиях горно-промышленного техногенеза и климатических колебаний: минералого-геохимические и палеоэкологические исследования” в рамках государственного задания Института минералогии Южно-Уральского ФНЦ минералогии и геоэкологии УрО РАН (номер государственного учета научно-исследовательской работы 124021200055-0)

Salt weathering of cement material of the Hussein-Bek Mausoleum (Chishminsky district, Republic of Bashkortostan)

Sergey S. Potapov¹, Olga Ya. Chervyatsova², Lyudmila Y. Kuzmina³, Sergey A. Sadykov¹

¹South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology, UB RAS, Institute of Mineralogy, Miass 456317, Russia, e-mail: s.potapov-60@yandex.ru

²Shulgan-Tash State Natural Biosphere Reserve, 14 Zapovednaya st., Irgyzy, Burzyan District, Bashkortostan Republic 453585, Russia, kittaryu@yandex.ru

³Ufa Federal Research Center of RAS, Ufa Institute of Biology, 69 Oktyabr av., Ufa 450054, Russia, e-mail: lky_kapova2020@mail.ru

Received 01.04.2025, accepted 11.06.2025

Research subject. Products of salt weathering on limestone building blocks of the Hussein-Bek Mausoleum, located in the Chishminsky District of the Republic of Bashkortostan. **Materials and methods.** The composition of salt weathering minerals was studied using X-ray phase, electron microscopic, energy-dispersive, and mass spectrometric analysis methods. **Results.** In the efflorescences, the following main minerals were found: gypsum $\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$, hamber-

Для цитирования: Потапов С.С., Червяцова О.Я., Кузьмина Л.Ю., Садыков С.А. (2026) Солевое выветривание строительных материалов мавзолея Хусейн-бека (Чишминский район, Республика Башкортостан). *Литосфера*, 26(1), 229-240. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2026-26-1-229-240>. EDN: JJMYWC

For citation: Potapov S.S., Chervyatsova O.Ya., Kuzmina L.Y., Sadykov S.A. (2026) Salt weathering of cement material of the Hussein-Bek Mausoleum (Chishminsky district, Republic of Bashkortostan). *Lithosphere (Russia)*, 26(1), 229-240. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2026-26-1-229-240>. EDN: JJMYWC

© С.С. Потапов, О.Я. Червяцова, Л.Ю. Кузьмина, С.А. Садыков, 2026

stonite $K_3Na_7Mg_2(SO_4)_6(NO_3)_2 \times 6H_2O$, darapskite $Na_3(SO_4)(NO_3) \times H_2O$, syngenite $K_2Ca(SO_4)_2 \times H_2O$, epsomite $MgSO_4 \times 7H_2O$, kieserite $MgSO_4 \times H_2O$, glauberite $Na_2Ca(SO_4)_2$, dolomite $CaMg(CO_3)_2$, and celestine $SrSO_4$. The sulfur isotope composition ($\delta^{34}S$) of the efflorescence minerals ranged from +7.28 to +11.38 ‰ V-CDT. Samples with hamberstonite and darapskite were characterized by light isotope enrichment, which is apparently associated with the biotic impact of bird guano. *Conclusions.* The main mechanism leading to destruction of the building stone of the Hussein-Bek Mausoleum was established to be salt weathering of the cement caused by the crystallization of authigenic minerals. The salt weathering of the Mausoleum is ornithogenic in nature, caused by the activity of birds, primarily field sparrows (*Passer montanus*).

Keywords: salt weathering, sulfates, nitrates, mineral composition, sulfur isotope, building stone, Hussein-Bek mausoleum, Republic of Bashkortostan

Funding information

The study was carried out within the framework of the topic "Natural systems under conditions of mining and industrial technogenesis and climatic fluctuations: mineralogical, geochemical and paleoecological studies" funded by the state assignment of the Institute of Mineralogy of the South Ural Federal Scientific Center of Mineralogy and Geocology of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (State registration No. 124021200055-0)

Acknowledgements

The authors are grateful to E.D. Zenovich, P.V. Khvorov (Institute of Mineralogy, South-Ural Federal Scientific Center of Mining and Geochemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Miass), I.I. Musabirov (Institute for Problems of Metal Superplasticity, RAS, Ufa) for carrying out analytical work and to Yu.M. Golovanov (South Ural Botanical Garden-Institute of the UFIC RAS, Ufa) for consultations.

ВВЕДЕНИЕ

Мавзолей (кэшиэнэ) Хусейн-бека (54°34'51" с. ш. 55°25'01" в. д.) – место захоронения Хаджи Хусейн-бека – первого имама (духовного главы мусульман) на территории современного Башкортостана, который находится в равнинной части Башкортостана, вблизи северного берега оз. Акзиарат (старницы р. Дёмы). Усыпальница расположена на юго-восточной окраине п. Чишмы, на территории древнего кладбища Акзиарат.

Аутентичное здание мавзолея было построено в XIV в. К XVIII–XIX вв. оно было сильно разрушено (обвалились наружный и внутренний купола, а также верхние части стен постройки). Уже в эти столетия руины мавзолея считались у местных жителей святыней периода ислама. В 1911 г. руины мавзолея XIV в. были реконструированы по распоряжению муфтия М.М. Султанова (1837–1915 гг.) на средства религиозной общины и добровольные пожертвования мусульман. Современное здание мавзолея (рис. 1) – это постройка прямоугольной формы с размерами 8.5 × 8.5 м и высотой 5.3 м, с толстыми стенами и полусферическим куполом, сложенными бутовым камнем (Гарустович, Нечвалода, 2020). В кладке восстановленного мавзолея использовался местный плотный среднеслоистый известняк нижнепермского возраста (шешминская свита, P₁šš) (Князев и др., 2013), добывавшийся в районе п. Чишмы.

Климат района умеренно континентальный, с холодной зимой и теплым сухим летом. Среднегодовая температура составляет 2.8°C. Максималь-

ные температуры (19°C) отмечаются в июле, а минимальные (–15°C) – в январе. Среднегодовое количество осадков достигает 400–500 мм, из них более половины выпадает в теплую часть года (Агроклиматические ресурсы..., 1976). Мавзолей окружен лесостепной растительностью и аграрными угодьями, занятыми зерновыми культурами. Памятник находится на территории древнего кладбища Акзиарат. Растительность на территории кладбища представлена нарушенными степями с небольшими искусственными насаждениями ели, березы, рябины. Вблизи этой территории находятся участки широколиственного леса с преобладанием дуба с примесью березы, липы, осины и вяза. Ниже расположены пойменные леса с преобладанием ольхи серой, черемухи обыкновенной, осины. К северной части кладбища примыкают сельскохозяйственные угодья.

По результатам обследования было установлено, что значительный ущерб, наблюдаемый на мавзолее Хусейн-Бека, связан с процессом солевого выветривания (*salt weathering*). Этот процесс связан с разрушением строительных материалов при кристаллизации аутигенных минералов из пересыщенных растворов в порах (Goudie, Viles, 1997). Кристаллы, растущие в ограниченном пространстве, могут создавать высокие напряжения, превышающие предел прочности многих строительных материалов. Например, давление кристаллизации сульфата натрия мирабилита – одного из наиболее распространенных агентов солевого выветривания – составляет 10 МПа при 23.5°C (Lindström et al., 2015).



Рис. 1. Современный вид мавзолея Хусейн-бека, заново отстроенного в 1911 г.

Fig. 1. The Hussein-Bek mausoleum as it appears today, rebuilt in 1911.

Основные типы разрушений строительных материалов, вызываемые соевым выветриванием, связаны с растрескиванием, гранулярной дезинтеграцией и расслаиванием (Doehne, 2002). Главными факторами, управляющими соевым выветриванием, помимо химического состава субстратов и капиллярных растворов, являются распределение пор по размерам (больше мелких пор = больше повреждений), радиус кривизны, проницаемость, скорость испарения, расположение относительно фронта воздушных потоков, шероховатость, смачиваемость субстрата и др. (Goudie, Viles, 1997; Doehne, 2002; Alves et al., 2021).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Полевые работы и отбор образцов проводились 17 июля 2023 г. Наблюдаемые повреждения строительных материалов документировались в соответствии с иллюстрированным глоссарием ICOMOS-ISCS (Illustrated Glossary..., 2008). Пробы солевых отложений отбирались в герметичную тару для предотвращения разложения нестабильных гидратированных минеральных видов.

Для грунтов и почвоподобных тел определяли влажность, pH водной и солевой вытяжек (Лыков, Туликов, 1976) с помощью pH метра Sartorius PB-11 (Германия) с погрешностью ± 0.03 .

Первичное описание и отбор монофракций минералов проводилось под бинокулярным микро-

скопом ЛОМО МСП-1 с камерой МС-12С (Россия). Морфология и элементный состав минеральных образцов изучались методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) TESCAN Vega 3 с X-АСТ (Oxford Instruments) в Институте проблем сверхпластичности металлов РАН (г. Уфа).

Минеральный состав аутигенных минеральных фаз определялся методом порошковой рентгенографии (XRD) с использованием дифрактометра ДРОН-2.0, CuK_α -излучение – на базе Института минералогии Южно-Уральского ФНЦ минералогии и геоэкологии УрО РАН (г. Миасс).

Изотопный состав серы минералов определялся на масс-спектрометре DeltaPlus Advantage производства фирмы Thermo Finnigan, сопряженном с элементным анализатором EA Flash1112 интерфейсом ConFlo III. Пробы упаковывались в оловянные тигли и сжигались в элементном анализаторе Flash1112. Изотопные отношения получены методом измерения изотопных отношений в непрерывном потоке газа (a continuous-flow IRMS). Ошибка измерений масс-спектрометра составила $\pm 0.14\%$. Изотопный состав серы выражен в шкале V-CDT (Giesemann et al., 1994; Grassineau et al., 2001).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Обнаружено, что на куполообразной кровле сооружения сформировались почвоподобные тела толщиной до нескольких сантиметров. На них раз-

вились степноподобные ценозы, в которых доминируют *Festuca valesiaca*, *Bromopsis inermis*, *Erysimum marschallianum*, а также присутствуют другие характерные степные виды (*Veronica prostrata*, *Galium octonarium* и др). В мавзолее присутствуют конструкционные повреждения внешних стен, в образовавшихся пустотах кладки активно гнездятся полевые воробьи (*Passer montanus*). Во время обследования в июле 2023 г. было зафиксировано 25 действующих гнездовий.

Влажность почвоподобных тел на кровле и стенах сооружения сопоставима с таковой окружающих почв и ожидаемо превышает влажность продуктов выветривания строительных материалов (табл. 1). Водные и солевые вытяжки демонстрируют слабощелочную реакцию вследствие присутствия карбонатов. При этом почвоподобные тела на кровле и фундаменте характеризуются несколько более кислыми значениями, чем окружающие почвы около памятника.

Было обнаружено, что основной причиной, вызывающей разрушение бутовой кладки мавзолея, выступает солевое выветривание цементного материала. Исследование с помощью СЭМ-ЭДС показывает, что исходный (не подвергнутый выветриванию) цемент сооружения является кварцево-силикатным на карбонатной вяжущей основе. Солевое выветривание развивается главным образом во внутренней части здания. Формы отложений солей различаются по высоте сооружения: на поверхности строительных материалов купола, как правило, развиваются корки (*encrustation* (Illustrated Glossary..., 2008)) светло-желтого и палевого цвета, которые часто имеют форму струйчатых налетов (рис. 2а, б). Наиболее опасная для сохранности здания форма солевого выветривания развивается в порах цементного материала в виде микрозернистых выцветов (*efflorescences and subflorescence* (Illustrated Glossar..., 2008)) на высоте примерно до

2 м от пола. Цемент, пораженный этим типом выветривания, подвержен гранулярной дезинтеграции (*granular disintegration* (Illustrated Glossary..., 2008)), легко выкрашивается, превращаясь в порошоквидную массу (рис. 2в–д). Глубина дезинтеграции цемента в некоторых местах достигает нескольких сантиметров.

Второй выявленной причиной разрушения сооружения мавзолея является химическая коррозия цементных швов (и в меньшей мере известняковых глыб) под влиянием агрессивных растворов, транспортируемых через кровлю купола из почвоподобных тел и гнезд птиц. В некоторых местах под действием таких протечек были “прожжены” сквозные отверстия (см. рис. 2а).

Образец минеральных корок со свода постройки характеризуется простым составом – это гипс с механическими примесями кварца и кальцита (рис. 3, см. дифрактограмму пробы Хус-6). Этот гипс сложен агрегатами пластинчатых кристаллов типа “гипсовых роз”, реже – одиночными кристаллами (рис. 4а, б).

Минеральные выцветы, развивающиеся по цементным швам в средней и нижней части стен сооружения (см. рис. 2в–д), имеют более сложный минеральный состав (см. рис. 3). В частности, минеральная ассоциация (см. рис. 3, 4) включает редкие двойные соли сульфат-нитраты: хамберстонит $K_3Na_7Mg_2(SO_4)_6(NO_3)_2 \times 6H_2O$ и дарапскит $Na_3(SO_4)(NO_3) \times H_2O$. Хамберстонит сложен агрегатами пластинчатых кристаллов (см. рис. 4в) и индивидуальными идиоморфными дипирамидальными кристаллами размером 5–15 мкм (см. рис. 4г, д).

Дарапскит представлен пластинчатыми индивидуальными длиной 10–40 мкм (см. рис. 4е). В ассоциации с хамберстонитом выявлен сингенит $K_2Ca(SO_4)_2 \times H_2O$, представляющий собой кристаллы прямоугольного сечения размером 20–30 мкм (см. рис. 4ж).

Таблица 1. Влажность и pH почвы рядом с мавзолеем в сравнении почвоподобными телами и минеральными продуктами выветривания строительных материалов

Table 1. Humidity and pH of the soil near the mausoleum in comparison with soil-like bodies and mineral products of weathering of building materials

Место отбора проб, части здания	Влажность, %	pH _{H₂O}	pH _{KCl}
Верхний горизонт почвы рядом с мавзолеем (сборный образец)	29.76 ± 0.20	7.62 ± 0.14	7.61 ± 0.17
Куполообразная кровля: почвоподобные тела под травянистой растительностью	24.31 ± 0.30	7.54 ± 0.15	7.86 ± 0.13
Северная сторона фундамента: почвоподобные тела под мхами	25.27 ± 0.25	7.63 ± 0.17	7.99 ± 0.05
Северная стена, кладка: рухляк, образованный цементной крошкой	11.96 ± 0.10	8.00 ± 0.07	8.12 ± 0.09

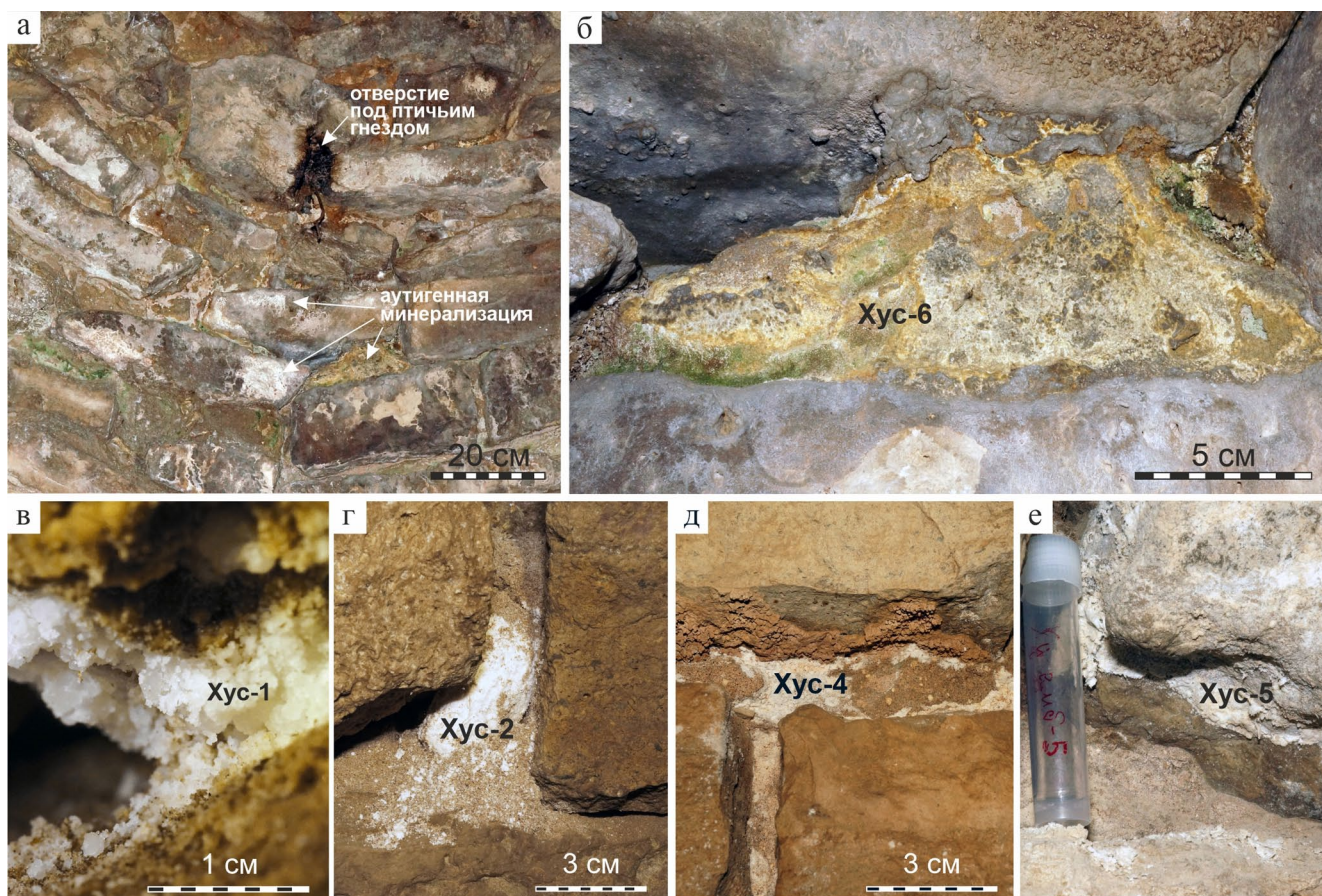


Рис. 2. Новообразованные минеральные отложения и формы солевого выветривания.

а – вид на купол мавзолея с отверстием под птичьим гнездом; б – аутигенная минерализация в виде светло-желтых корок (encrustation) на куполе; в–д – минеральные выцветы (efflorescences) на стенах внутренней части, развивающиеся по цементным швам.

Fig. 2. Authigenic minerals deposits and forms of salt weathering.

а – view of the mausoleum dome with an opening under a bird's nest; б – authigenic mineralization in the form of light yellow crusts (encrustation) on the dome; в–д – mineral efflorescences on the walls of the inner part, developing along the cement joints.

Также обнаружены сульфаты магния, среди которых эпсомит $MgSO_4 \times 7H_2O$, представляющий собой изометричные сростки частично ограниченных кристаллов с характерными трещинами дегидратации (см. рис. 4з) и кизерит $MgSO_4 \times H_2O$. Они находятся в ассоциации с ромбоэдрическими кристаллами доломита размером 10–20 мкм (см. рис. 4и). Присутствие новообразованного доломита указывает на экстремально высокие соотношения Mg/Ca, характерные для условий испарительного насыщения (Novoselov et al., 2023).

Также в акцессорном количестве методом СЭМ-ЭДС были обнаружены игольчатые кристаллы Na-Ca сульфата, по химическому составу отнесенные к глаубериту $Na_2Ca(SO_4)_2$ (рис. 5а) (на XRD подтвердить диагностику не удалось ввиду малого содержания в пробах). Также методом СЭМ-ЭДС бы-

ли обнаружены акцессорные включения целестина $SrSO_4$ (рис. 5б).

Изотопный состав серы $\delta^{34}S$ минералов из высолов находится в диапазоне от +7.3 до +11.4 ‰ V-CDT (табл. 2). Для изученных проб облегченным составом серы характеризуются пробы с хамберстонитом (Хус-1) и дарапскином (Хус-3), которые содержат азотную группировку.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Известно, что определенные соли, такие как сульфат натрия и магния, неизменно эффективны при солевом выветривании, тогда как нитраты относительно менее эффективны (Goudie, Viles, 1997). В нашем случае наиболее активный вклад

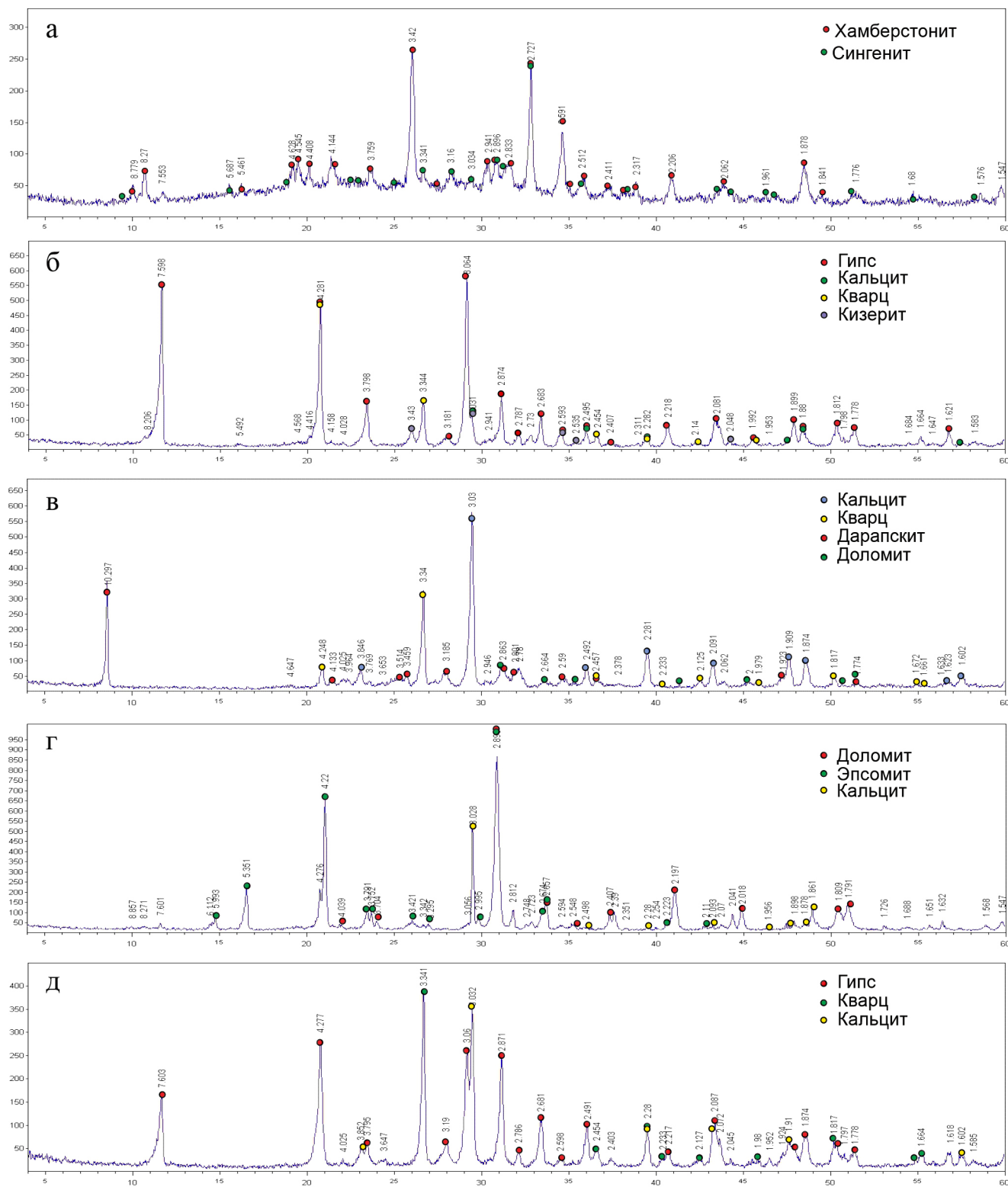


Рис. 3. Рентгенограммы (XRD) проб солевых отложений мавзоля Хусейн-Бека.

а – Хус-1; б – Хус-2; в – Хус-3; г – Хус-5; д – Хус-6.

Fig. 3. X-ray diffraction patterns (XRD) of salt deposit samples from the Hussein-Bek Mausoleum.

а – Khus-1; б – Khus-2; в – Khus-3; г – Khus-5; д – Khus-6.

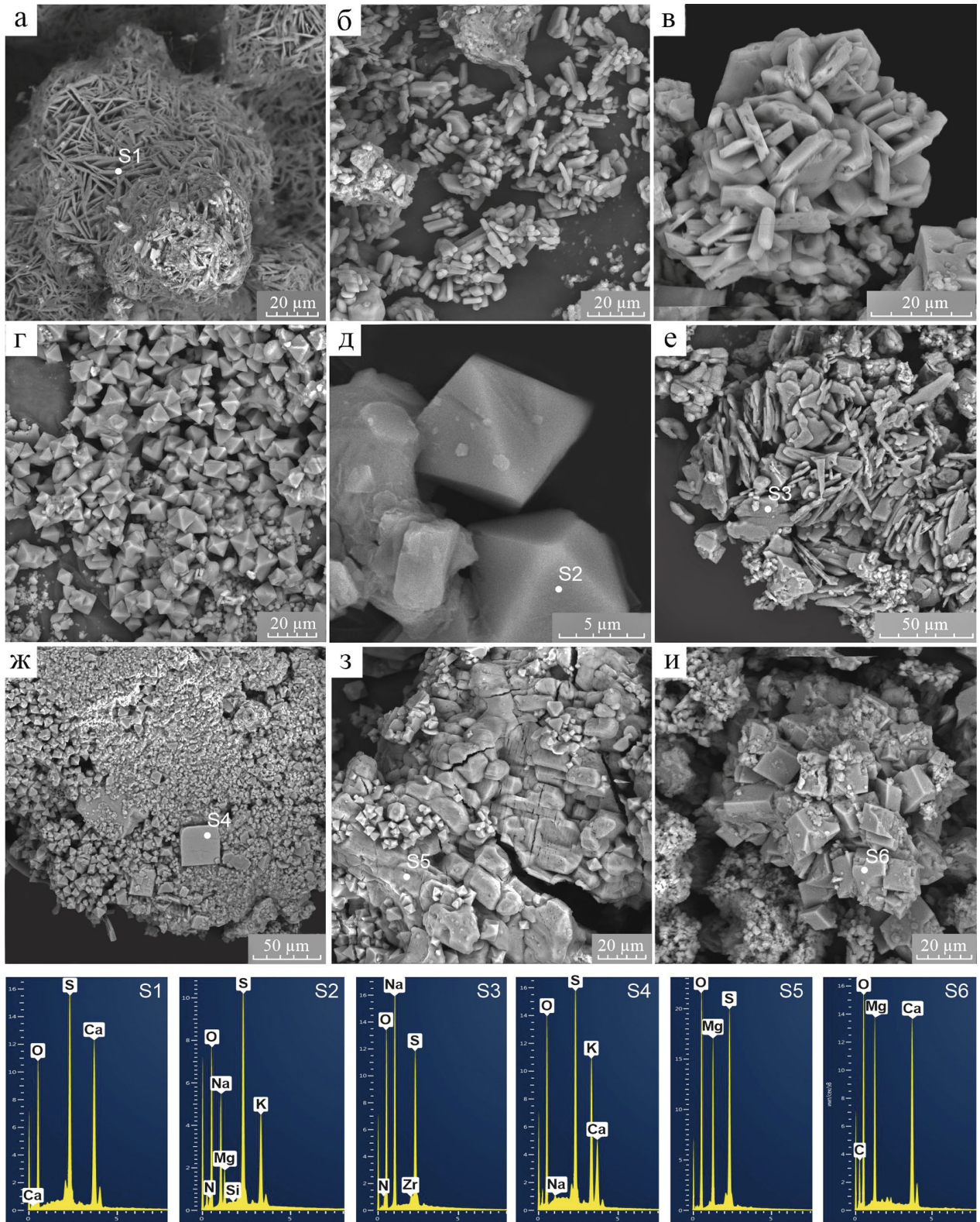


Рис. 4. СЭМ-фото минералов, диагностика которых подтверждена двумя методами (XRD + ЭДС).

а, б – гипс; в-д – хамберстонит; е – дарапскит; ж – сингенит; з – эпсомит; и – доломит.

Fig. 4. SEM photos of minerals, the diagnostics of which were confirmed by two methods (XRD + EDS).

а, б – gypsum; в-д – humberstonite, е – darapskite, ж – syngenite, з – epsomite, и – dolomite.

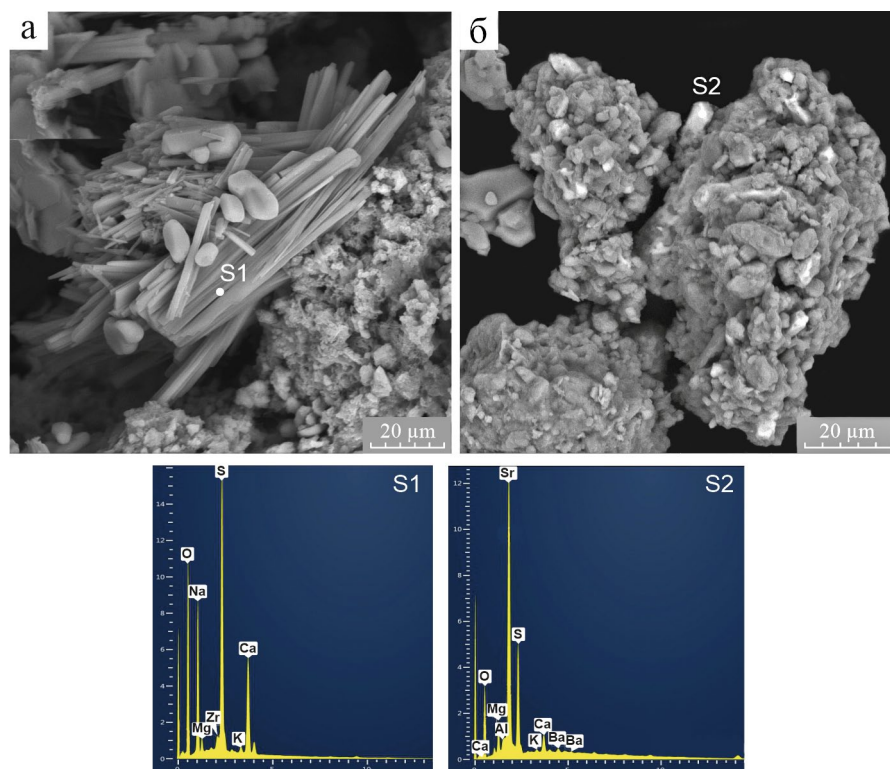


Рис. 5. Минералы, диагностированные только методом СЭМ-ЭДС.

Предполагаемые по составу: а – глауберит, б – целестин.

Fig. 5. Minerals diagnosed only by the SEM-EDS method.

Inferred composition: а – glauberite, б – celestine.

в солевое выветривание может оказывать эпсомит $MgSO_4 \times 7H_2O$, неравновесные формы кристаллов которого свидетельствуют о кристаллизации в порах материала, при капиллярном питании. Сульфаты магния с различным содержанием кристаллически связанной воды (эпсомит и кизерит) могут

свидетельствовать о процессах гидратации и дегидратации в различные сезоны, что также происходит с увеличением объема и может способствовать разрушению материалов.

Информация об эффективности двойных солей в процессах солевого выветривания ограниче-

Таблица 2. Изотопный состав серы ($\delta^{34}S$) проб вторичных минеральных образований (высолов) на строительных материалах мавзолея Хусейн-бека

Table 2. Isotopic composition of sulfur ($\delta^{34}S$) of samples of secondary mineral formations (efflorescence) on building materials of the Hussein-bek mausoleum

№ пробы	Описание пробы, минеральный состав	$\delta^{34}S$, ‰ V-CDT
Хус-1	Минеральный порошок: хамберстонит $K_3Na_7Mg_2(SO_4)_6(NO_3)_2 \times 6(H_2O)$, сингенит $K_2Ca(SO_4)_2 \times (H_2O)$	+7.3
Хус-2	Минеральный порошок: гипс $CaSO_4 \times 2H_2O$, кизерит	+11.4
Хус-3	Минеральный порошок: дарапскит $Na_3(SO_4)(NO_3) \times (H_2O)$	+8.5
Хус-5	Минеральный порошок: эпсомит $MgSO_4 \times 7H_2O$	+9.4
Хус-6	Минеральный порошок: гипс $CaSO_4 \times 2H_2O$	+9.9

на из-за относительно редкой встречаемости таких минералов в природе. Однако имеются сведения, что дарапскит является активным агентом выветривания (Lindström et al., 2015). О его экссудативном росте из пор может также свидетельствовать неравновесная морфология кристаллов, зафиксированная для наших образцов. Дарапскит может существовать при температуре не ниже 13.8°C, а при влажности выше 85% происходит его растворение (Lindström et al., 2015). Это значит, что благоприятные условия для его кристаллизации наблюдаются в теплое время года, вероятно поздней весной, когда упругость водяного пара в воздухе минимальна. Хамберстонит образует изометричные эвгедральные кристаллы, что скорее всего свидетельствует об их росте в свободном пространстве, в пленке воды (а не в порах субстрата). Возможно, вклад хамберстонита в выветривание менее значителен.

В настоящем исследовании не обнаружены сульфаты натрия (мирабилит и тенардит), являющиеся одними из наиболее агрессивных деструкторов строительных материалов (Потапов, Ершов, 1993; Goudie, Viles, 1997). Однако известно, что раствор, получаемый при растворении дарапскита, пересыщен по отношению к тенардиту и мирабилиту при температурах ниже 23.8°C или только к тенардиту при более высоких температурах (Lindström et al., 2015). Следовательно, сульфаты натрия могут появляться в холодное время года или в общем случае в условиях пониженных температур и повышенной относительной влажности, как это имеет место на станции метро Новоафонской пещеры (Потапов и др., 2019).

Полученные результаты показывают, что солевое выветривание наряду с другими климатически обусловленными процессами является значимым фактором разрушения сооружения.

Известно, что помет (гуано) птиц выступает важным фактором, вызывающим солевое выветривание (Venavente et al., 2021). Птичий помет благодаря составу является агрессивной средой для сооружений из природного камня. В составе помета птиц помимо биогенных элементов (С, N, P) присутствуют значительные (до первых процентов) концентрации Cl, S, Na, K (Huang, Lavenburg, 2011). Следовательно, растворы, получаемые при выщелачивании помета птиц, обогащаются этими элементами и могут быть ответственными за наблюдаемый набор новообразованных минеральных видов в составе высолов. Источники Ca и Mg, скорее всего, связаны с выносом из строительных материалов (известняка, цемента). Биогенный характер высолов под воздействием помета птиц доказывается также присутствием двойных солей сульфатов-нитратов. Альтернативными (или дополнительными) источниками минералообразующих ионов могли служить добавки гипса в цемент (источник сульфатов), а также куриных яиц, богатых ми-

кроэлементами (источник нитритов и сульфатов Mg, Na и K). Дополнительным источником азота может быть растительность купола мавзолея, в которой могут присутствовать виды, способные фиксировать почвенный азот в симбиозе с бактериями. Крыша мавзолея с почвоподобными телами, мхом и степной растительностью создает благоприятные условия для испарительных процессов и аккумуляции сульфатов и хлоридов Mg, Na и K.

Птичий помет, особенно при злаковой диете, характеризуется пониженным pH (Spennemann, Watson, 2017), что значительно усиливает процессы коррозии строительных материалов. Это может объяснить форсированную коррозию строительных материалов и появление отверстий в куполе мавзолея под гнездами птиц.

Основным фактором, влияющим на значение δ^{34} в гуано, является состав δ^{34} различных компонентов трофической цепи (Richards et al., 2003). Главным пищевым ресурсом для полевых воробьев в этом районе являются культурные злаковые растения с местных сельскохозяйственных угодий. Значение δ^{34} для биомассы растений наследуется из δ^{34} SO_4^{2-} почвенных растворов, которые, в свою очередь, представляют собой смесь δ^{34} в анионах SO_4^{2-} , получаемых из осадков и горных пород (Hermes et al., 2022). Тем самым биомасса растений в районе мавзолея (и как следствие – гуано полевых воробьев) будет нести отпечаток δ^{34} от почвообразующих пород пермского возраста (рис. 6), находящийся в пределах +11.0 ... +13.9‰ (Claypool et al., 1980), а также воды, используемой для орошения полей и атмосферных осадков. Мы не знаем значений δ^{34} в мелиоративных водах, однако наиболее часто встречаемые величины для континентального стока находятся в диапазоне +7 ... +8‰ (Kurtz et al., 2003). Тяжелый изотопный состав в некоторых пробах (Хус-2 и Хус-6) также может быть следствием прямого участия морского осадочного гипса как источника SO_4^{2-} (если он добавлялся в цементный раствор).

Тем самым наблюдаемые значения $\delta^{34}\text{S}$ (+7.3 – +11.4 ‰) новообразованных минералов можно объяснить смесью различных источников SO_4^{2-} с дальнейшей передачей по трофической цепи с полевыми воробьями. При этом наиболее легкие значения δ^{34} в (до +7.3‰) тоже могут быть связаны как с биологическим фракционированием (Richards et al., 2003), так и с дополнительными источниками серы, например с техногенными выбросами в диапазоне от –3 ... +9‰ в промышленно развитых странах (Mayer, 1998).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным механизмом деструкции строительного камня, выявленным в мавзолее Хусейн-бека, является солевая коррозия цемента – процесс,

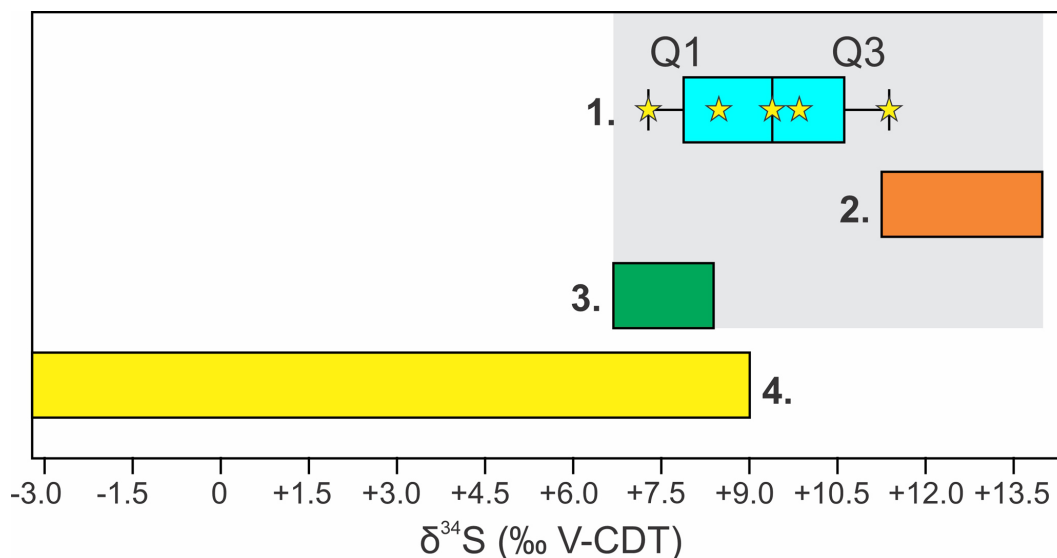


Рис. 6. Диаграмма изотопного состава $\delta^{34}\text{S}$ сульфатах высолов с мавзолея Хусайн-бека в сравнении с потенциальными источниками SO_4^{2-} .

Наблюдаемые составы высолов с мавзолея (1) могут объясняться смешиванием (серая область) SO_4^{2-} из пород пермского возраста (2) и вод континентального стока (3), предположительно с передачей по пищевым цепям птицами. Также возможно влияние техногенных поллютантов (4) и биологического фракционирования. Источники данных: см. текст.

Fig. 6. Diagram of the $\delta^{34}\text{S}$ isotopic composition of sulfate from the Khusain Bek mausoleum efflorescence (1), compared with potential SO_4^{2-} sources.

The observed compositions from the mausoleum can be explained by the mixing of SO_4^{2-} from Permian-age rocks (2) and continental runoff waters (3), presumably via transmission along trophic chains by birds. Technogenic pollutants (4) and biological fractionation may also be influential. Data sources: see text.

связанный с кристаллизацией аутигенных минералов из пересыщенных растворов. В составе минеральной ассоциации выявлены сульфаты (гипс, эпсомит, кизерит, сингенит, глауберит, целестин), двойные соли сульфаты-нитраты (хамберстонит, дарапскит), а также карбонаты (кальцит, доломит). Наибольшим потенциалом к солевому выветриванию обладают эпсомит и дарапскит.

По нашему мнению, солевое выветривание на мавзолее Хусейн-бека имеет орнитогенную природу. Мавзолей Хусейн-бека расположен вблизи сельскохозяйственных угодий, занятых зерновыми культурами. Это привлекает в этот район птиц, преимущественно полевых воробьев (*Passer montanus*), использующих свободные пространства внутри кладки для гнездовых. Для предотвращения гнездования птиц необходимо ликвидировать свободные пространства внутри кладки. В некоторых местах сооружения имеющийся цемент сильно подвержен длительными процессами солевого выветривания и требует обновления для предотвращения разрушения конструкции.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Е.Д. Зенович, П.В. Хворову (Институт минералогии, Южно-Уральский фе-

деральный научный центр горного дела и геохимии, Уральское отделение Российской академии наук, Миасс), И.И. Мусабинову (Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа) за проведение аналитических работ и Ю.М. Голованову (Южно-Уральский ботанический сад – институт УФИЦ РАН, Уфа) за консультации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агроклиматические ресурсы Башкирской АССР. (1976) Л.: Гидрометеоиздат, 235 с.
- Гарустович Г.Н., Нечвалода А.И. (2020) Средневековые каменные мавзолеи Башкортостана (история, археология, биоантропология). Уфа: Китап, 400 с.
- Князев Ю.Г., Князева О.Ю., Сначев В.И., Жданов А.В. (2013) Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (3-е поколение). Сер. Уральская. Л. N-40 – Уфа. Объясн. зап. СПб.: ВСЕГЕИ, 512 с.
- Лыков В.М., Туликов А.М. (1976) Практикум по земледелию с основами почвоведения. М.: Колос, 192 с.
- Потапов С.С., Ершов В.В. (1993) Вторичное минералобразование в стеновых покрытиях. *Урал. минер. сб. № 1*. Екатеринбург: Наука, 120-123.
- Потапов С.С., Червяцова О.Я., Паршина Н.В. (2019) Минеральные новообразования при деструкции зданий и сооружений во влажном морском субтропическом

климате Республики Абхазия. *Минералогия техногенеза*, (20), 51-61.

- Alves C., Figueiredo C.A.M., Sanjurjo-Sánchez J., Hernández A.C. (2021) Salt Weathering of Natural Stone: A Review of Comparative Laboratory Studies. *Heritage*, **4**(3), 1554-1565. <https://doi.org/10.3390/heritage4030086>
- Benavente D., De Jongh M., Cañaveras J.C. (2021) Weathering Processes and Mechanisms Caused by Capillary Waters and Pigeon Droppings on Porous Limestones. *Minerals*, **11**(1), 18. <https://doi.org/10.3390/min11010018>
- Claypool G.E., Holser W.T., Kaplan I.R., Sakai H., Sak I. (1980) The age curves of sulfur and oxygen isotopes in marine sulfate and their mutual interpretation. *Chem. Geol.*, **28**, 199-260. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(80\)90047-9](https://doi.org/10.1016/0009-2541(80)90047-9)
- Doehne E. (2002) Salt weathering: a selective review. *London Geol. Soc., spec. publ.*, **205**(1), 51-64.
- Giesemann A., Jager H.J., Norman A.L., Krouse H.P., Brand W.A. (1994) Online sulfur-isotope determination using an elemental analyzer coupled to a mass-spectrometer. *Analyt. Chem.*, **66**(18), 2816-2819. <https://doi.org/10.1021/ac00090a005>
- Goudie A.S., Viles H.A. (1997) Salt Weathering. Chichester, UK: Wiley, 241 p.
- Grassineau N.V., Matthey D., Lowry D. (2001) Sulfur isotope analysis of sulfide and sulfate minerals by continuous flow-isotope ratio mass spectrometry. *Analyt. Chem.*, **73**(2), 220-225. <https://doi.org/10.1021/ac000550f>
- Hermes A.L., Dawson T.E., Hinckley E.L.S. (2022) Sulfur isotopes reveal agricultural changes to the modern sulfur cycle. *Environ. Res. Lett.*, **17**(5), 054032. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac6683>
- Huang C.P., Lavenburg G. (2011) Impacts of bird droppings and deicing salts on highway structures: monitoring, diagnosis, prevention. Delaware Center for Transportation; University of Delaware DCT. Report 221, 22 p.
- Illustrated Glossary on Stone Deterioration Patterns (2008). Monuments and Sites XV. (Ed. by V. Vergès-Belmin). Paris: ICOMOS, 86 p.
- Kurtz A.C., Kump L.R., Arthur M.A., Zachos J.C., Paytan A. (2003) Early Cenozoic decoupling of the global carbon and sulfur cycles. *Paleoceanography*, **18**(4). <https://doi.org/10.1029/2003PA000908>
- Lindström N., Heitmann N., Linnow K., Steiger M. (2015) Crystallization behavior of NaNO₃ – Na₂SO₄ salt mixtures in sandstone and comparison to single salt behavior. *App. Geochem.*, **63**, 116-132. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.07.007>
- Mayer B. (1998) Potential and limitations of using sulphur isotope abundance ratios as an indicator for natural and anthropogenic induced environmental change. *Isotope techniques in the study of environmental change. Proceedings of 830 International conference IAEA*, 423-435.
- Novoselov A., Konstantinov A., Konstantinova E., Simakova Y., Lim A., Kurasova A., Loiko S., Pokrovsky O.S. (2023) Semiarid lakes of southwestern Siberia as sentinels of on-going climate change: hydrochemistry, the carbon cycle, and modern carbonate mineral formation. *Atmosphere*, **14**(11), 1624. <https://doi.org/10.3390/atmos14111624>
- Richards M.P., Fuller B.T., Sponheimer M., Robinson T., Ayliffe L. (2003) Sulphur isotopes in palaeodietary studies: a review and results from a controlled feeding experiment. *Int. J. Osteoarchaeol.*, **13**(1-2), 37-45.
- Spennemann D.H.R., Watson M.J. (2017) Dietary habits of urban pigeons (*Columba livia*) and implications of excreta pH – a review. *Europ. J. Ecol.*, **3**(1), 27-41. <https://doi.org/10.1515/eje-2017-0004>

REFERENCES

- Agroclimatic resources of the Bashkir ASSR (1976) Lenin-grad, Gidrometioizdat Publ., 235 p.
- Alves C., Figueiredo C.A.M., Sanjurjo-Sánchez J., Hernández A.C. (2021) Salt Weathering of Natural Stone: A Review of Comparative Laboratory Studies. *Heritage*, **4**(3), 1554-1565. <https://doi.org/10.3390/heritage4030086>
- Benavente D., De Jongh M., Cañaveras J.C. (2021) Weathering Processes and Mechanisms Caused by Capillary Waters and Pigeon Droppings on Porous Limestones. *Minerals*, **11**(1), 18. <https://doi.org/10.3390/min11010018>
- Claypool G.E., Holser W.T., Kaplan I.R., Sakai H., Sak I. (1980) The age curves of sulfur and oxygen isotopes in marine sulfate and their mutual interpretation. *Chem. Geol.*, **28**, 199-260. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(80\)90047-9](https://doi.org/10.1016/0009-2541(80)90047-9)
- Doehne E. (2002) Salt weathering: a selective review. *London Geol. Soc., spec. publ.*, **205**(1), 51-64.
- Garustovich G.N., Nechvaloda A.I. (2020) Medieval stone mausoleums of Bashkortostan (history, archeology, bio-anthropology). Ufa, Kitap Publ., 400 p.
- Giesemann A., Jager H.J., Norman A.L., Krouse H.P., Brand W.A. (1994) Online sulfur-isotope determination using an elemental analyzer coupled to a mass-spectrometer. *Analyt. Chem.*, **66**(18), 2816-2819. <https://doi.org/10.1021/ac00090a005>
- Goudie A.S., Viles H.A. (1997) Salt Weathering. Chichester, UK, Wiley, 241 p.
- Grassineau N.V., Matthey D., Lowry D. (2001) Sulfur isotope analysis of sulfide and sulfate minerals by continuous flow-isotope ratio mass spectrometry. *Analyt. Chem.*, **73**(2), 220-225. <https://doi.org/10.1021/ac000550f>
- Hermes A.L., Dawson T.E., Hinckley E.L.S. (2022) Sulfur isotopes reveal agricultural changes to the modern sulfur cycle. *Environ. Res. Lett.*, **17**(5), 054032. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac6683>
- Huang C.P., Lavenburg G. (2011) Impacts of bird droppings and deicing salts on highway structures: monitoring, diagnosis, prevention. Delaware Center for Transportation; University of Delaware DCT. Report 221, 22 p.
- Illustrated Glossary on Stone Deterioration Patterns (2008). Monuments and Sites XV. (Ed. by V. Vergès-Belmin). Paris, ICOMOS, 86 p.
- Knyazev Yu.G., Knyazeva O.Yu., Snachev V.I., Zhdanov A.V. (2013) State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1.000.000 (third generation). Ural Series. Sheet N-40 – Ufa. Explanatory note. Saint Petersburg, VSEGEI Publ., 512.
- Kurtz A.C., Kump L.R., Arthur M.A., Zachos J.C., Paytan A. (2003) Early Cenozoic decoupling of the global carbon and sulfur cycles. *Paleoceanography*, **18**(4). <https://doi.org/10.1029/2003PA000908>
- Lindström N., Heitmann N., Linnow K., Steiger M. (2015) Crystallization behavior of NaNO₃ – Na₂SO₄ salt mixtures in sandstone and comparison to single salt behavior. *App. Geochem.*, **63**, 116-132. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.07.007>

- Mayer B. (1998) Potential and limitations of using sulphur isotope abundance ratios as an indicator for natural and anthropogenic induced environmental change. *Isotope techniques in the study of environmental change. Proceedings of 830 International conference IAEA*, 423-435.
- Novoselov A., Konstantinov A., Konstantinova E., Simakova Y., Lim A., Kurasova A., Loiko S., Pokrovsky O.S. (2023) Semiarid lakes of southwestern Siberia as sentinels of on-going climate change: hydrochemistry, the carbon cycle, and modern carbonate mineral formation. *Atmosphere*, **14**(11), 1624. <https://doi.org/10.3390/atmos14111624>
- Potapov S.S., Chervyatsova O.Ya., Parshina N.V. (2019) Mineral neof ormations during destruction of buildings and structures in the humid marine subtropical climate of the Republic of Abkhazia. *Mineralogiya tekhnogenez*, (20), 51-61. (In Russ.)
- Potapov S.S., Ershov V.V. (1993) Secondary mineral formation in wall coverings. *Ural. miner. sb. no. 1*. Ekaterinburg, Nauka Publ., 120-123.
- Richards M.P., Fuller B.T., Sponheimer M., Robinson T., Ayliffe L. (2003) Sulphur isotopes in palaeodietary studies: a review and results from a controlled feeding experiment. *Int. J. Osteoarchaeol.*, **13**(1-2), 37-45.
- Spennemann D.H.R., Watson M.J. (2017) Dietary habits of urban pigeons (*Columba livia*) and implications of excreta pH – a review. *Europ. J. Ecol.*, **3**(1), 27-41. <https://doi.org/10.1515/eje-2017-0004>