



<https://doi.org/10.35597/2313-545X-2025-11-4-1>

УДК 549.676.21 (470.54)

Cs-содержащий шабазит из Мариинского (Малышевского) изумрудно-бериллиевого месторождения, Средний Урал

А.О. Карпов^{1, 2}, А.А. Агаханов²

¹ Московский государственный университет, Ленинские горы 1, г. Москва, 119991 Россия

² Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН, Ленинский пр-т 18-2, г. Москва, 119071 Россия;
karpovao@my.msu.ru

Статья поступила в редакцию 19.09.2025 г., после доработки 21.10.2025 г., принята к печати 10.11.2025 г.

Аннотация. В образцах из Мариинского (Малышевского) месторождения (Изумрудные копи Урала) диагностированы шабазит-Са и шабазит-К, образующие чечевицеобразные двойники размером до 1–2 мм на прените. Оба цеолита представлены необычными Cs-содержащими разновидностями: шабазит-Са содержит до 1.20 мас. % Cs₂O (до 0.10 к.ф. Cs), а шабазит-К – до 0.75 мас. % Cs₂O (0.05 к.ф. Cs). В отличие от шабазита-К, шабазит-Са содержит примесь Sr (до 1.50 мас. % SrO = 0.15 к.ф. Sr). Усредненная формула шабазита-Са – (Ca_{1.16}K_{0.51}Mg_{0.21}Na_{0.16}Sr_{0.08}Cs_{0.06})(Al_{3.71}Si_{8.31})O₂₄·11.9H₂O (n = 30), шабазита-К – (K_{1.21}Ca_{0.97}Na_{0.26}Mg_{0.12}Cs_{0.04})(Al_{3.63}Si_{8.36})O₂₄·12.1H₂O (n = 15). Полученные для обоих минералов инфракрасные спектры, порошковые рентгенограммы и рассчитанные параметры элементарных ячеек хорошо согласуются с литературными данными для шабазита. Находка Cs-содержащего шабазита из Изумрудных копей является первой на Урале и, вероятно, второй в России.

Ключевые слова: шабазит, цеолиты, цезий, Мариинское месторождение, Малышевское месторождение, Изумрудные копи Урала

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант 24-27-00225.

Благодарности. Авторы благодарят И.В. Пекова и Л.А. Паутова за помощь в поиске литературных источников и ценные замечания при обсуждении материала статьи, М.М. Моисеева за предоставленный для исследования образец, Н.А. Пекову – за фотографии образцов шабазита.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанных с рукописью.

Вклад авторов. А.О. Карпов – разработка концепции, исследования методом инфракрасной спектроскопии, написание рукописи; А.А. Агаханов – исследования методами электронно-зондового анализа и порошковой рентгенографии. Все авторы одобрили финальную версию статьи перед публикацией.

Для цитирования: Карпов А.О., Агаханов А.А. Cs-содержащий шабазит из Мариинского (Малышевского) изумрудно-бериллиевого месторождения, Средний Урал. *Минералогия*, 2025, 11(4), 5–20. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2025-11-4-1>

Cs-bearing chabazite from the Mariinskoe (Malyshevskoe) emerald-beryllium deposit, Middle Urals

A.O. Karpov^{1, 2}, A.A. Agakhanov²

¹ Moscow State University, Leninskie Gory 1, Moscow, 119991 Russia; karpovao@my.msu.ru

² Fersman Mineralogical Museum RAS, Leninskiy pr. 18-2, Moscow, 119071 Russia

Received 19.09.2025, revised 21.10.2025 accepted 10.11.2025

Abstract. Chabazite-Ca and chabazite-K are found in specimens from the Mariinskoe (Malyshevskoe) deposit (Ural Emerald mines). They form lenticular twins up to 1–2 mm on prehnite. Both zeolites are characterized by an atypically high Cs content: up to 1.20 wt. % Cs₂O (0.10 apfu Cs) in chabazite-Ca and up to 0.75 wt. % Cs₂O (0.05 apfu Cs) in chabazite-K. In contrast to chabazite-K, chabazite-Ca also contains Sr: up to 1.50 wt. % SrO = 0.15 apfu Sr. Averaged formula is (Ca_{1.16}K_{0.51}Mg_{0.21}Na_{0.16}Sr_{0.08}Cs_{0.06})(Al_{3.71}Si_{8.31})O₂₄·11.9H₂O for chabazite-Ca (n = 30) and (K_{1.21}Ca_{0.97}Na_{0.26}Mg_{0.12}Cs_{0.04})(Al_{3.63}Si_{8.36})O₂₄·12.1H₂O for chabazite-K (n = 15). Infrared spectra, X-ray powder diffraction data and calculated unit cell parameters of both minerals are in good agreement with published data for chabazite. Our finding of Cs-bearing chabazite from the Ural Emerald mines is the first in the Urals and likely the second in Russia.

Keywords: chabazite, zeolite, cesium, Mariinskoe deposit, Malyshevskoe deposit, Ural Emerald mines

Funding. This work was supported by the Russian Science Foundation, project no. 24-27-00225.

Acknowledgements. We are grateful to I.V. Pekov and L.A. Pautov for help with literature and discussion, M.M. Moiseev for providing a specimen for the study, and N.A. Pekova for images of the chabazite specimens.

Conflict of interest. The authors declare that they have no conflicts of interest.

Author contribution. A.O. Karpov – conceptualization, IR spectroscopy, writing of the article; A.A. Agakhanov – EPMA and PXRD data. All the authors approved the final version of the manuscript prior to publication.

For citation: Karpov A.O., Agakhanov A.A. Cs-bearing chabazite from the Mariinskoe (Malyshevskoe) emerald-beryllium deposit, Middle Urals. *Mineralogy*, 2025, 11(4), 5–20. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2025-11-4-1>

ВВЕДЕНИЕ

Шабазит – очень широко распространенный минерал группы цеолитов, впервые охарактеризованный И. фон Борном в 1772 г. как «белый кубический цеолит из Исландии» (von Born, 1772). Название «шабазит» («chabasie») введено в минералогическую литературу Л.-О. Боск д'Антиком в 1792 г., а в близком к современному написании («chabasit») – И.А. Брейтгауптом в 1818 г. (Bosc d'Antic, 1792; Breithaupt, 1818). Серия шабазита объединяет пять минеральных видов: шабазит-Ca, шабазит-Na, шабазит-K, шабазит-Sr и шабазит-Mg (Coombs et al., 1997; Montagna et al., 2010). В упрощенном виде общую формулу этих минералов можно записать как (M⁺_{4-2x}M²⁺_x□_x)Al₄Si₈O₂₄·12H₂O, однако в силу многообразия изоморфных замещений (в том числе с участием вакансий) как в каналах, так и в алюмосиликатном каркасе, кристаллохимическая формула природных шабазитов может в различной степени отклоняться от идеализированной

(Passaglia, 1970; Gottardi, Galli, 1985; Пеков и др., 2004; Montagna et al., 2010).

Каркас цеолитов со структурным типом шабазита (в соответствии с системой, принятой Международной цеолитовой ассоциацией (IZA), этот структурный тип обозначается аббревиатурой СНА (Baerlocher et al., 2007)) состоит из двухэтажных шестичленных колец, расположенных перпендикулярно оси с и соединенных наклонными четырехчленными кольцами. Этот каркас пронизан трехмерной системой каналов, в раздувах которых находятся крупные эллипсоидальные полости «фонари» (Wyart, 1933; Dent, Smith, 1958; Якубович и др., 2005). Топологически симметрия шабазитового каркаса тригональная, но частичное упорядочение Si и Al может понижать ее до триклинной (Mazzi, Galli, 1983); в триклинной сингонии кристаллизуется Si-Al упорядоченный низкокремнистый аналог шабазита – уиллхендерсонит (Peacor et al., 1984; Fisher et al., 2008 и ссылки в этих работах).

Анализируя доступную нам литературу и данные интернет-сайта www.mindat.org, можно сделать вывод, что минералы семейства шабазита в местонахождениях мира распространены следующим образом: шабазит-Ca >>> шабазит-Na > шабазит-K > шабазит-Mg ≥ шабазит-Sr, т. е. наиболее обычен Ca-доминантный, а наиболее редок Mg- и Sr-доминантный шабазит.

Шабазит – крупнопористый цеолит, с легкостью вступающий в реакции ионного обмена (Barrer, 1950). В последнее время остро стоит проблема очистки жидких радиоактивных отходов и, в частности, загрязненных радионуклидами сбросовых вод АЭС – в т. ч. от изотопа ^{137}Cs , одного из главных компонентов радиоактивного загрязнения биосферы. Поэтому к шабазиту и его синтетическим аналогам (СНА-цеолитам) как к сорбентам ионов цезия из растворов приковано внимание ученых со всего мира: достаточно отметить, что этой проблеме посвящены десятки статей (Barrer, 1950; Barrer, Sammon, 1955; Barrer, Baynham, 1956; Barrer, Langley, 1958; Ames, 1961, 1966; Barrer et al., 1963, 1969; Mimura, Kanno, 1985; Calligaris et al., 1986; Pansini, 1996; Duer, Zubair, 1998; Mimura et al., 1999; de Gennaro et al., 2003; Borai et al., 2009; Kong et al., 2016; Lee et al., 2016; Abtahi et al., 2018; Baek et al., 2018; Figueiredo et al., 2018; Misaelides et al., 2018; Aono et al., 2020; Yang et al., 2021; Chaerun et al., 2022; Watanabe et al., 2022; Fan et al., 2023; Zhang et al., 2023; Battsetseg et al., 2024; Kawata et al., 2024; Parsons et al., 2024). Авторы процитированных работ отмечают очень высокую селективность шабазита к ионам Cs^+ и его большую эффективность в сравнении с другими цеолитами (клиноптилолитом, морденитом, стильбитом или гейландитом): так, ионообменники именно на основе шабазита использовались для очистки вод от Cs после аварии на АЭС Фукусима-1 в 2011 г. (ссылки выше).

В настоящей работе с помощью современных аналитических методов изучен необычный Cs-содержащий шабазит из Мариинского (Малышевского) изумрудно-бериллиевого месторождения, входящего в структуру Изумрудных копей Урала. Состав шабазита из Изумрудных копей публикуется впервые.

КРАТКИЙ ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ОЧЕРК

Мариинское (после 1927 г. Малышевское) изумрудно-бериллиевоe месторождение расположено в пос. Малышева Асбестовского городско-

го округа Свердловской области (Средний Урал) (рис. 1а). Вопросам минералогии, геологии, геохимии и генезиса, а также истории освоения и изучения месторождений Изумрудных копей Урала и, в первую очередь, именно Мариинского (Малышевского) месторождения, посвящены сотни статей и серия монографий (Власов, Кутукова, 1960; Золотухин, 1996; Попов и др., 1998, 2008; Золотухин и др., 2004; Жернаков, 2009, 2011; Попов, 2014) – достаточно отметить, что на 2008 г. библиография по объектам Изумрудных копей Урала включала более 600 ссылок (Попов и др., 2008), поэтому геологическое строение месторождения ниже представлено в кратком виде.

Изумрудные копи Урала, объединяющие более 30 месторождений и рудопроявлений Be, Ta, Mo и драгоценных камней (изумруда, александрита и фенакита), расположены в восточной экзоконтактовой зоне крупного Адуйского гранитного массива. Открытое в 1833 г. Мариинское (Малышевское) месторождение находится в северной части этой полосы, в узком клине метаморфических пород между Адуйским и Малышевским гранитными массивами. С запада рудная зона месторождения отделена от адуйских гранитов телами диоритов, которые являются северным окончанием Лесозаводского массива, линзовидными блоками амфиболитов, прослоями кварцитов и углисто-кремнистых сланцев (рис. 1б). Рудный комплекс месторождения представлен изумрудоносными флогопитовыми слюдитами (а также тальковыми, хлоритовыми, тальк-хлоритовыми и актинолитовыми породами) и бериллоносными кварц-плагиоклазовыми жилами (Золотухин и др., 2004; Жернаков, 2009). Слюдиты представляют собой метасоматические породы, развитые по серпентинитам, и, вероятно, являются своеобразными апогипербазитовыми грейзенами. Изредка диориты и амфиболиты разбиты жилами альпийского типа. Мариинское (Малышевское) изумрудно-бериллиевоe месторождение – крупнейшее из объектов Изумрудных копей и единственное промышленно разрабатываемое в настоящее время; оно также является единственным источником изумруда и александрита в России.

Впервые шабазит из Малышевского месторождения был описан К.А. Власовым и Е.И. Кутуковой в 1960 г. под названием «факолит». Минерал был встречен в виде сдвойникованных мелких кристаллов до 1 мм и их агрегатов до 4 мм в поперечнике, которые в ассоциации с фенгитом выполняли пустоты в плагиоклазе или нарастали на пренит

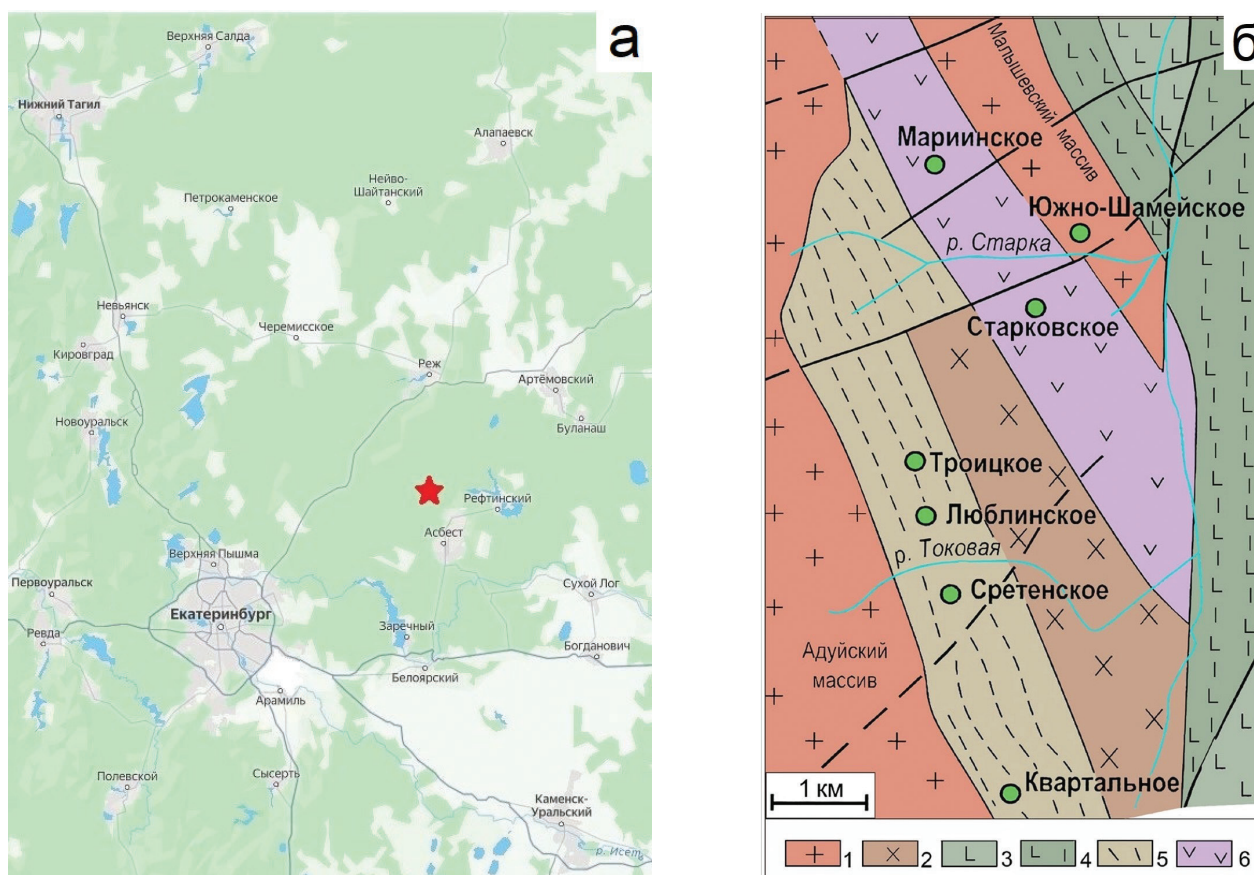


Рис. 1. Географическое положение Мариинского (Малышевского) месторождения (отмечено звездочкой) (а) и схема геологического строения центрального участка Изумрудных копей по (Жернаков, 2009; Попова и др., 2023) (б).

1 – граниты; 2 – диориты; 3 – амфиболовые сланцы; 4 – амфиболиты; 5 – тальк-тремолит-хлоритовые сланцы и кварциты; 6 – серпентинитовый меланж.

Fig. 1. Geographical location of the Mariinsk (Malyshevsk) deposit (red star) (a) and geological scheme of the central area of the Emerald mines after (Zhernakov, 2009; Popova et al., 2023) (b).

1 – granite; 2 – diorite; 3 – amphibole schist; 4 – amphibolite; 5 – talc-tremolite-chlorite schist, quartzite; 6 – serpentinite mélange.

(Власов, Кутукова, 1960). К сожалению, полный химический анализ материала первой находки не производился, шабазит был диагностирован по оптическим константам и данным спектрального анализа.

Позднее шабазит из этого же месторождения был описан В.И. Жернаковым. По его данным, шабазит встречается главным образом в маломощных жилах альпийского типа среди амфиболитов, которые выполнены агрегатом корродированного плагиоклаза, пренита и кальцита. Реже в них присутствуют эпидот, титанит и кварц. Шабазит в этих жилах обычно образует мелкие зубчатые двойники прораствания и отдельные ромбоэдрические кристаллы в пустотах пренитового агрегата. Минерал бесцветный, полупрозрачный; замутнение кристаллов обусловлено включениями тонких чешуек хлорита

(Жернаков, 1985, 2009). Шабазит диагностирован по оптическим константам и рентгенограмме; химический состав минерала не определялся.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Нами изучены три образца шабазита из Мариинского (Малышевского) месторождения: образец № 97408 из систематической коллекции Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана РАН (ММФ РАН, г. Москва, Россия), отобранный в 1990-х гг., и два образца из частных коллекций, отобранных в шахте месторождения в 1970-х гг. Для минерала получены электронно-зондовые анализы, ИК-спектры и порошковые рентгенограммы, рассчитаны параметры элементарной ячейки.



Рис. 2. Бесцветные кристаллы шабазита-К из Мариинского (Малышевского) месторождения на прените с присыпками пирита.

Поле зрения 4.5 см. Обр. № 97408 из коллекции ММФ РАН. Фото: Н.А. Пекова.

Fig. 2. Colorless chabazite-K crystals from the Mariinskoe (Malyshevskoe) deposit on prehnite with pyrite crystals.

Field of view is 4.5 cm. FMM RAS specimen № 97408. Photo: N.A. Pekova.



Рис. 3. Желтые кристаллы шабазита-Са из Мариинского (Малышевского) месторождения на прените.

Поле зрения 4 см. Образец из коллекции А.О. Карпова. Фото: Н.А. Пекова.

Fig. 3. Yellow chabazite-Ca crystals from the Mariinskoe (Malyshevskoe) deposit on prehnite.

Field of view is 4 cm. Specimen from collection of A.O. Karpov. Photo: N.A. Pekova.

Все исследования проводились в лаборатории ММФ РАН. Химический состав шабазита изучен на электронно-зондовом микроанализаторе JCSA Superprobe 733 фирмы JEOL с энергодисперсионным Si(Li)-детектором с ультратонким окном ATW2 и системой анализа INCA Energy 350 фирмы Oxford Instruments. Условия анализа: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 1 нА, диаметр электронного зонда 1–2 мкм. Аналитические линии и стандарты (образцы сравнения) $K\alpha$: Na, Al – альбит, Mg – хромит, Si – SiO_2 ; K – микроклин; Ca – волластонит; $L\alpha$: Sr – SrSO_4 ; Cs – $\text{Cs}_2\text{Nb}_4\text{O}_{11}$. Расчет эмпирических формул шабазита проводился на 24 атома кислорода. ИК спектры шабазита получены на инфракрасном Фурье-спектрометре ФСМ 2201 (ООО «Инфраспек», Россия). Спектры снимались в суспензии с вазелиновым маслом на пластинках-подложках из КВг. Параметры съемки: диапазон волновых чисел $370\text{--}4000\text{ см}^{-1}$ (диапазон длин волн $27\text{--}2.5\text{ мкм}$), разрешение 4 см^{-1} , 50 сканов. Порошковые рентгенограммы шабазита получены на дифрактометре ДРОН-2 (Fe $K\alpha$ -излучение, Mn-фильтр, эталон – кварц).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Морфология шабазита. Шабазит Мариинского (Малышевского) месторождения в образце из коллекции ММФ РАН (по результатам нашего исследования это шабазит-К) образует бесцветные чечевицеобразные («факолитовые») двойники по (0001) до 2 мм на друзе светло-бежевых дисковидных кристаллов пренита до 1.5 см, покрывающих поверхность трещины в сланцеватой амфиболсодержащей породе с примазками талька. Пренит присыпан мелкими кубооктаэдрами пирита (рис. 2). Образцы из частных коллекций сходны между собой. В них шабазит (шабазит-Са) образует мелкие (около 1 мм) светло-желтые чечевицеобразные двойники и их корки, обрастающие кристаллы бесцветного пренита до 1 см (рис. 3), которые выполняют полости в массивном агрегате зеленоватого пренита, ассоциирующего с кальцитом, а также с бавенитом и редкими зернами флюорита.

Химический состав. В изученных образцах нами диагностированы шабазит-Са (желтые кристаллы) и шабазит-К (бесцветные кристаллы). Химический состав шабазита представлен в табл. 1 и 2. Главными катионами, заселяющими каналы структуры, являются Са и К, примесны-

Таблица 1. Химический состав шабазита-Са из Мариинского (Малышевского) месторождения
Table 1. Chemical composition of chabazite-Ca from the Mariinskoe (Malyshevskoe) deposit

№ анализа	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Мас. %																
Na ₂ O	0.46	0.35	0.47	0.32	0.42	0.43	0.47	0.39	0.27	0.32	0.37	0.42	0.56	0.42	0.34	0.23
K ₂ O	2.17	1.98	2.26	2.36	2.44	2.31	2.07	2.24	2.09	2.26	2.18	2.29	2.24	2.13	2.31	2.26
Cs ₂ O	0.60	1.20	0.63	0.71	1.16	0.97	0.78	0.74	1.10	0.89	0.98	0.80	0.67	0.79	1.01	0.96
CaO	6.47	6.42	6.08	6.07	6.09	6.41	6.51	6.11	6.17	6.36	6.58	6.64	6.85	6.82	6.34	6.70
SrO	1.14	1.29	0.89	1.07	1.12	1.27	1.23	1.00	0.76	0.88	1.11	1.18	1.16	0.66	0.94	1.49
MgO	0.64	0.54	0.81	0.90	0.73	0.75	0.76	0.78	0.82	0.96	0.88	0.98	1.02	0.88	0.78	0.98
Al ₂ O ₃	18.03	18.29	17.80	17.65	17.97	18.67	18.48	17.74	18.12	18.08	18.10	19.35	19.31	19.36	18.42	18.62
SiO ₂	47.10	47.19	47.07	46.16	46.72	48.59	48.19	46.85	48.26	48.41	47.41	50.03	50.02	50.61	49.16	48.67
Сумма	76.61	77.26	76.01	75.24	76.65	79.40	78.49	75.85	77.59	78.16	77.61	81.69	81.83	81.67	79.30	79.91
Коэффициенты формулы, рассчитанные на 24 О																
Na	0.16	0.12	0.16	0.11	0.14	0.14	0.16	0.13	0.09	0.11	0.12	0.13	0.18	0.13	0.11	0.08
K	0.49	0.44	0.51	0.54	0.55	0.50	0.45	0.51	0.46	0.50	0.48	0.48	0.47	0.45	0.50	0.49
Cs	0.05	0.09	0.05	0.05	0.09	0.07	0.06	0.06	0.08	0.07	0.07	0.06	0.05	0.06	0.07	0.07
Ca	1.22	1.20	1.15	1.17	1.15	1.17	1.20	1.16	1.14	1.17	1.23	1.17	1.21	1.20	1.15	1.22
Sr	0.12	0.13	0.09	0.11	0.11	0.13	0.12	0.10	0.08	0.09	0.11	0.11	0.11	0.06	0.09	0.15
Mg	0.17	0.14	0.21	0.24	0.19	0.19	0.19	0.21	0.21	0.25	0.23	0.24	0.25	0.22	0.20	0.25
Σ _{вн.к.}	2.20	2.13	2.17	2.22	2.24	2.20	2.18	2.17	2.07	2.17	2.25	2.20	2.26	2.11	2.13	2.24
Al	3.73	3.78	3.71	3.73	3.75	3.75	3.74	3.71	3.70	3.67	3.72	3.76	3.75	3.74	3.68	3.72
Si	8.28	8.27	8.31	8.27	8.26	8.27	8.27	8.31	8.35	8.33	8.26	8.25	8.23	8.30	8.34	8.25
Σ _к	12.01	12.04	12.02	12.00	12.01	12.02	12.01	12.02	12.05	12.00	11.97	12.01	11.98	12.04	12.03	11.97

Таблица 1 (продолжение)

Table 1 (continued)

№ анализа	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	Среднее
Мас. %																
Na ₂ O	0.37	0.65	0.54	0.67	0.55	0.68	0.63	0.46	0.53	0.68	0.56	0.68	0.65	0.73	0.71	0.49
K ₂ O	2.21	3.55	2.46	2.55	2.52	2.47	2.34	2.55	2.17	2.49	2.46	2.39	2.56	2.37	2.51	2.36
Cs ₂ O	0.87	0.97	0.83	1.06	0.80	0.84	0.99	0.77	0.96	0.85	0.69	0.86	0.78	0.78	0.86	0.87
CaO	6.72	6.41	6.15	6.29	6.33	6.04	6.25	6.34	6.46	6.47	6.17	6.25	6.19	6.52	6.12	6.37
SrO	1.15	0.90	0.19	0.68	0.74	0.28	0.57	0.51	0.31	0.48	0.14	0.53	0.45	0.36	0.60	0.81
MgO	0.59	0.82	0.90	0.80	0.92	0.73	0.78	0.81	1.03	0.71	0.91	0.89	0.79	0.85	0.71	0.82
Al ₂ O ₃	19.15	18.52	18.72	18.34	18.24	18.71	18.35	17.94	18.45	18.74	18.58	18.87	18.82	19.25	18.70	18.50
SiO ₂	48.66	49.08	49.59	49.90	49.59	48.75	48.89	48.94	49.84	50.00	50.29	49.99	50.03	49.75	50.14	48.83
Сумма	79.72	80.90	79.38	80.29	79.69	78.50	78.80	78.32	79.75	80.42	79.80	80.46	80.27	80.61	80.35	79.05
Коэффициенты формулы, рассчитанные на 24 О																
Na	0.12	0.21	0.18	0.22	0.18	0.22	0.21	0.15	0.17	0.22	0.18	0.22	0.21	0.24	0.23	0.16
K	0.48	0.76	0.53	0.55	0.54	0.54	0.51	0.56	0.46	0.53	0.52	0.51	0.54	0.50	0.53	0.51
Cs	0.06	0.07	0.06	0.08	0.06	0.06	0.07	0.06	0.07	0.06	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
Ca	1.22	1.16	1.11	1.13	1.14	1.10	1.14	1.16	1.16	1.16	1.10	1.12	1.11	1.16	1.09	1.16

Окончание таблицы
End of the table

№ анализа	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	Среднее
Коэффициенты формулы, рассчитанные на 24 O																
Sr	0.11	0.09	0.02	0.07	0.07	0.03	0.06	0.05	0.03	0.05	0.01	0.05	0.04	0.03	0.06	0.08
Mg	0.15	0.21	0.23	0.20	0.23	0.19	0.20	0.21	0.26	0.18	0.23	0.22	0.20	0.21	0.18	0.21
$\Sigma_{\text{вн.к.}}$	2.14	2.49	2.12	2.24	2.23	2.14	2.19	2.19	2.15	2.19	2.10	2.18	2.16	2.20	2.15	2.19
Al	3.82	3.67	3.71	3.63	3.63	3.76	3.69	3.62	3.65	3.69	3.66	3.71	3.70	3.77	3.68	3.71
Si	8.23	8.26	8.35	8.37	8.36	8.31	8.34	8.38	8.36	8.34	8.40	8.33	8.35	8.27	8.37	8.31
$\Sigma_{\text{к}}$	12.05	11.93	12.06	12.00	11.99	12.08	12.03	12.00	12.01	12.03	12.05	12.04	12.05	12.04	12.05	12.02

Примечание. Здесь и в табл. 2, $\Sigma_{\text{вн.к.}}$ – сумма внекаркасных катионов; $\Sigma_{\text{к}}$ – сумма атомов каркаса.Note. Here and in Table 2, $\Sigma_{\text{вн.к.}}$ – sum of extra-framework cations; $\Sigma_{\text{к}}$ – sum of framework atoms.

Таблица 2. Химический состав шабазита-К из Мариинского (Малышевского) месторождения

Table 2. Chemical composition of chabazite-K from the Mariinskoe (Malyshevskoe) deposit

№ ан.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Среднее
мас. %																
Na ₂ O	0.73	0.87	0.78	0.85	0.82	0.71	0.68	0.79	0.68	0.74	0.78	0.80	0.87	0.72	0.71	0.77
K ₂ O	5.59	5.78	5.80	5.66	5.57	5.68	5.23	5.09	5.25	5.36	5.64	5.58	5.22	5.52	5.49	5.50
Cs ₂ O	0.54	0.68	0.46	0.59	0.39	0.53	0.45	0.43	0.56	0.55	0.28	0.73	0.46	0.75	0.46	0.52
CaO	5.07	4.78	5.19	5.09	5.19	5.07	5.28	5.06	5.04	5.25	5.63	5.60	5.59	5.36	5.32	5.23
MgO	0.57	0.47	0.49	0.54	0.50	0.52	0.49	0.50	0.56	0.39	0.62	0.40	0.34	0.33	0.47	0.48
Al ₂ O ₃	17.91	17.99	18.17	17.78	17.72	18.26	17.30	17.46	17.52	17.76	17.68	18.29	18.10	18.32	18.09	17.89
SiO ₂	48.81	48.83	48.69	48.73	48.98	48.47	47.76	47.47	47.70	48.60	48.75	49.02	48.45	48.87	48.96	48.54
Сумма	79.22	79.40	79.58	79.24	79.17	79.24	77.19	76.80	77.31	78.65	79.38	80.42	79.03	79.87	79.50	78.94
Коэффициенты формулы, рассчитанные на 24O																
Na	0.24	0.29	0.26	0.28	0.27	0.24	0.23	0.27	0.23	0.25	0.26	0.26	0.29	0.24	0.23	0.26
K	1.22	1.26	1.27	1.24	1.22	1.24	1.17	1.15	1.18	1.18	1.23	1.21	1.14	1.20	1.20	1.21
Cs	0.04	0.05	0.03	0.04	0.03	0.04	0.03	0.03	0.04	0.04	0.02	0.05	0.03	0.05	0.03	0.04
Ca	0.93	0.88	0.95	0.94	0.95	0.93	0.99	0.96	0.95	0.97	1.03	1.02	1.03	0.98	0.97	0.97
Mg	0.15	0.12	0.12	0.14	0.13	0.13	0.13	0.13	0.15	0.10	0.16	0.10	0.09	0.08	0.12	0.12
$\Sigma_{\text{вн.к.}}$	2.58	2.60	2.63	2.64	2.60	2.58	2.56	2.54	2.54	2.54	2.70	2.64	2.58	2.56	2.56	2.59
Al	3.62	3.64	3.66	3.60	3.58	3.69	3.58	3.63	3.62	3.61	3.57	3.66	3.67	3.68	3.64	3.63
Si	8.37	8.37	8.33	8.37	8.40	8.32	8.39	8.37	8.37	8.39	8.35	8.32	8.33	8.33	8.36	8.36
$\Sigma_{\text{к}}$	11.99	12.01	11.99	11.97	11.97	12.01	11.98	12.00	12.00	12.00	11.92	11.97	11.99	12.02	12.00	11.99

ми – Na, Mg, Sr и Cs. Шабазит Мариинского (Малышевского) месторождения обогащен Cs: от 0.6 до 1.2 мас. % Cs₂O (до 0.1 к.ф. Cs) содержится в шабазите-Са и от 0.30 до 0.75 мас. % Cs₂O (до 0.05 к.ф. Cs) в шабазите-К. Шабазит-Са также содержит до 1.50 мас. % SrO (до 0.15 к.ф. Sr) в отличие от шабазита-К, во всех анализах которого содержание стронция ниже предела обнаружения. Магний фиксируется в обоих цеолитах: до 1 мас. % MgO

(до 0.25 к.ф. Mg) в шабазите-Са и до 0.60 мас. % MgO (до 0.15 к.ф. Mg) в шабазите-К. Усредненная формула шабазита-Са – (Ca_{1.16}K_{0.51}Mg_{0.21}Na_{0.16}Sr_{0.08}Cs_{0.06})(Al_{3.71}Si_{8.31})O₂₄·11.9H₂O (n = 30), шабазита-К – (K_{1.21}Ca_{0.97}Na_{0.26}Mg_{0.12}Cs_{0.04})(Al_{3.63}Si_{8.36})O₂₄·12.1H₂O (n = 15) (содержание воды в минерале рассчитано по дефициту суммы электронно-зондового анализа). Изученные кристаллы шабазита в отраженных электронах однородны и незональны.

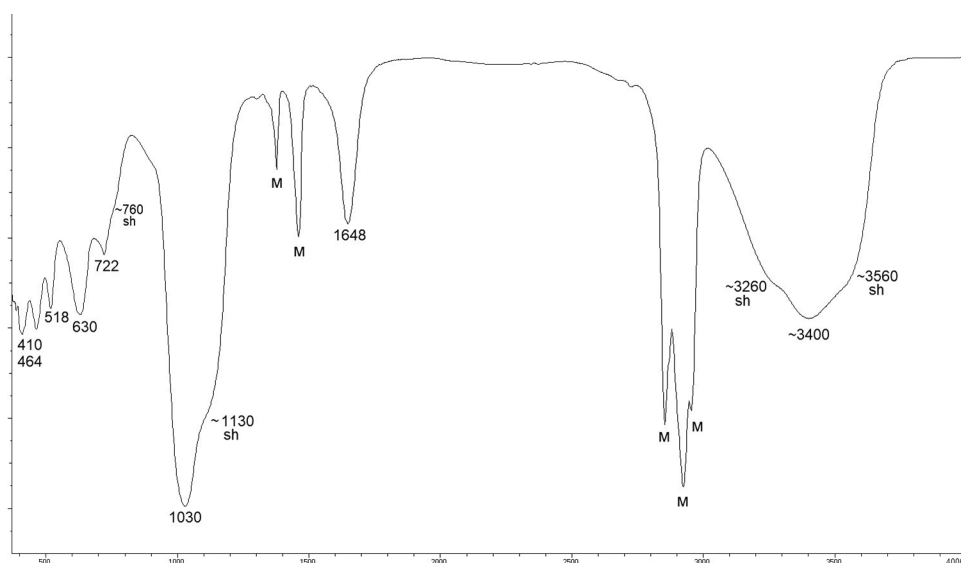


Рис. 4. Инфракрасный спектр шабазита-Са из Мариинского (Малышевского) месторождения. sh – плечо, м – полоса вазелинового масла.

Fig. 4. Infrared spectra of chabazite-Ca from the Mariinskoe (Malyshevskoe) deposit. sh – shoulder, m – nujol band.

Как показывает анализ литературных данных, цезий – нехарактерный примесный элемент для шабазита. Ранее Cs-содержащий шабазит-Са был описан А.В. Волошиным с соавторами в образцах из гранитных пегматитов Вороньих Тундр (центральная часть Кольского полуострова). Минерал представлен двумя разновидностями: мелкокристаллическими корками бесцветных ромбоэдров шабазита-I, содержащих 1.25 мас. % Cs_2O , и нарастающими на них темно-красными ромбоэдрами Fe-содержащего (5.5–11.3 мас. % FeO)¹ шабазита-II размером до 1 мм, которые содержат 3.1–3.4 мас. % Cs_2O ². Шабазит ассоциирует с фэйрфилдитом, сподуменом и обогащенным цезием (17.25 мас. % Cs_2O) анальцимом (Белоконова и др., 1985; Волошин и др., 1986). До 0.4 мас. % Cs_2O содержит шабазит-Са, замещающий и обрастающий совместно с гармотомом более ранний поллуцит в поллуцит-гармотом-шабазитовых «гнездах» из гранитного пегматита Вежна I (*Věžná I*) в Чехии (Toman, Novák, 2018). До 0.13 мас. % Cs_2O содер-

жит шабазит-Са, замещающий олигоклаз в пегматоидных лейкогранитах батолита О'Грэди (*O'Grady batholith*) в Канаде (Ercit et al., 2003). Таким образом, хотя синтетический Cs-замещенный шабазит был получен десятками групп исследователей (см. выше), в природе даже незначительная примесь Cs в составе этого цеолита является редкой.

Ранее на Мариинском (Малышевском) месторождении был описан Cs-содержащий (до 4.2 мас. % Cs_2O) анальцим, также ассоциирующий с пренитом (Житова и др., 2017). Мы предполагаем, что повышенное содержание Cs в цеолитах может быть в целом характерно для поздних гидротермальных образований Мариинского месторождения³.

Инфракрасная спектроскопия. Полученные нами ИК-спектры шабазита-Са и шабазита-К Малышевского месторождения практически идентичны между собой (рис. 4) и близки к опубликован-

¹ Примесь Fe нехарактерна для шабазита, и содержание Fe в минерале из Вороньих Тундр – самое высокое из известных для этого цеолита. О проблеме Fe-содержащего шабазита см.: Toman, 2011 и ссылки в этой работе.

² Шабазит-I также содержит примесь Sr (1.8 мас. % SrO), а в шабазите-II содержание Sr ниже предела обнаружения методом электронно-зондового анализа (Волошин и др., 1986).

³ Слюдитовые комплексы Изумрудных копей Урала в целом обогащены Cs (а также Li и Rb): содержание Cs_2O в рудных телах Мариинского (Малышевского) месторождения достигает 0.1 мас. % (Ласковенков, Золотухин, 1982). Собственные минералы Cs здесь неизвестны, и Cs, главным образом, изоморфно замещает K во флогопите слюдитов. Берилл Мариинского (Малышевского) месторождения содержит, по разным оценкам, от 200 до 1000 г/т Cs (Власов, Кутукова, 1960; Бидный и др., 2011; Попов, 2014; Aurisicchio et al., 2018; Karampelas et al., 2019; Popov et al., 2021; Гаврильчик и др., 2021; Zheng et al., 2024).

Таблица 3. Результаты расчета рентгеновских порошковых диаграмм шабазита-Са и шабазита-К из Мариинского (Малышевского) месторождения

Table 3. X-ray powder diffraction data of chabazite-Ca and chabazite-K from the Mariinskoe (Malyshevskoe) deposit

Шабазит-Са		Шабазит-К				
<i>I</i>	<i>d</i> _{изм.} (Å)	<i>I</i>	<i>d</i> _{изм.} (Å)	<i>h</i>	<i>k</i>	<i>l</i>
49	9.34	53	9.35	1	0	1
14	6.90	10	6.91	1	1	0
6	6.35	5	6.37	0	1	2
20	5.56	22	5.55	0	2	1
42	5.00	40	5.00	0	0	3
5	4.68	10	4.68	2	0	2
100	4.33	100	4.33	2	1	1
4	4.05	3	4.05	1	1	3
10	3.99	9	3.98	3	0	0
26	3.87	26	3.87	1	2	2
29	3.57	27	3.58	1	0	4
15	3.45	14	3.45	2	2	0
8	3.24	7	3.23	1	3	1
11	3.18	18	3.18	0	2	4
80	2.932	80	2.931	4	0	1
8	2.906	15	2.907	0	1	5
43	2.884	50	2.885	2	1	4
4	2.838	6	2.839	2	2	3
9	2.776	6	2.776	0	4	2
9	2.680	5	2.679	2	0	5
16	2.609	18	2.609	4	1	0
5	2.575	6	2.573	2	3	2
18	2.496	18	2.499	1	2	5
4	2.309	5	2.311	4	1	3
7	2.302	7	2.998	3	3	0
2	2.275	4	2.276	5	0	2
2	2.122	3	2.123	5	1	1
14	2.091	9	2.090	3	3	3
4	2.062	3	2.063	1	5	2
5	1.914	4	1.913	5	2	0
5	1.869	9	1.869	5	0	5
10	1.804	13	1.803	4	2	5
5	1.787	3	1.786	5	2	3
3	1.770	3	1.771	6	1	2
2	1.731	3	1.731	1	2	8
7	1.725	8	1.726	4	4	0

ным в литературе спектрам шабазита (Юхневич и др., 1961; Юхневич, Сендеров, 1963; Панеш и др., 1967; Белицкий, Голубова, 1972; Pechar, Rykl, 1983; Ľuda et al., 1984; Волошин и др., 1986; Архипенко и др., 1995; Пеков и др., 2000; Пеков и др., 2004; Зонхоева, Санжанова, 2011; Chukanov, 2014; Дампилова, Зонхоева, 2019).

Спектр этого цеолита имеет простое строение: наиболее интенсивная полоса при 1030 см^{-1} (осложненная плечом при $\sim 1130\text{ см}^{-1}$) отвечает антисимметричным валентным колебаниям (Si,Al)-O, уширенная полоса с максимумом при $\sim 720\text{ см}^{-1}$, осложненная плечом при $\sim 760\text{ см}^{-1}$ – симметричным валентным колебаниям (Si,Al)-O, а полосы в диапазоне $370\text{--}550\text{ см}^{-1}$ (при $\sim 410, 465$ и 520 см^{-1}) – деформационным O-(Si,Al)-O колебаниям тетраэдров каркаса и так называемым решеточным колебаниям. Полоса при 630 см^{-1} , интенсивная полоса при $\sim 1650\text{ см}^{-1}$ и «колокол» в диапазоне $3000\text{--}3700\text{ см}^{-1}$ (с максимумом при $\sim 3400\text{ см}^{-1}$) отвечают соответственно либрационным, деформационным и валентным колебаниям OH-групп молекул H_2O (Брек, 1976; Pechar, Rykl, 1983). По формуле, предложенной в работе (Пеков и др., 2004), по частоте наиболее интенсивной (Si,Al)-O полосы в ИК-спектре цеолита ($\nu_{\max}$) можно оценить его глиноземистость, т. е. отношение Al : Si (x). Для шабазита Малышевского месторождения $x \sim 0.44$, а $\nu_{\max}$ (1030 см^{-1}) несколько ниже теоретической $\nu_{\max}$ (1042 см^{-1}) при таком значении x , что может указывать на частичное упорядочение Al и Si в тетраэдрах каркаса.

Порошковая рентгенография. Рентгеновские порошковые диаграммы изученных шабазита-Са и шабазита-К Мариинского (Малышевского) месторождения также практически идентичны. Результаты расчета рентгенограмм приведены в табл. 3. Оба шабазита кристаллизуются в тригональной сингонии (пр. гр. $R\bar{3}m$); параметры элементарных ячеек, вычисленные по порошковой диаграмме: $a = 13.798$ (1) Å, $c = 14.990$ (3) Å, $V = 2471.6$ (9) Å³ для шабазита-Са; $a = 13.796$ (1) Å, $c = 14.996$ (3) Å, $V = 2472.0$ (9) Å³ для шабазита-К. Полученные результаты хорошо согласуются с данными для шабазита из справочной литературы и из базы данных ICDD PDF, а зафиксированной примеси Cs недостаточно для существенного влияния на метрику ячейки.

ВЫВОДЫ

Таким образом, в образцах из Мариинского (Малышевского) месторождения (Уральские Изумрудные копи) обнаружены два родственных цеолита – шабазит-Са и шабазит-К, образующие сдвойникованные кристаллы до 1–2 мм на прените. Полученные для минералов инфракрасные спектры и порошковые рентгенограммы хорошо согласуются с опубликованными в литературе данными для шабазита. Шабазит-Са и шабазит-К месторождения представлены необычными Cs-содержащими разновидностями: они содержат до 1.2 и 0.7 мас. % Cs_2O (т. е. до 0.10 и 0.05 к.ф. Cs) соответственно. Шабазит-Са также содержит примесь Sr (до 1.50 мас. % $\text{SrO} = 0.15$ к.ф. Sr) в отличие от шабазита-К. Ранее из Мариинского месторождения был описан Cs-содержащий анальцит (Житова и др., 2017), из чего можно предположить, что обогащение цеолитов в целом характерно для поздних гидротермальных образований месторождения. Наша находка Cs-содержащего шабазита-Са является первой на Урале и, вероятно, второй в России; примесь Cs в шабазите-К зафиксирована впервые.

ЛИТЕРАТУРА

- Архипенко Д.К., Валуева Г.П., Мороз Т.Н. (1995) Выяснение пространственной группы шабазита. *Журнал структурной химии*, 36(1), 192–197.
- Белицкий И.А., Голубова Г.А. (1972) Инфракрасные спектры природных цеолитов. *Материалы по генетической и экспериментальной минералогии*, 7, 310–322.
- Белоконев Е.Л., Максимов Б.А., Верин И.А., Сирота М.И., Волошин А.В., Пахомовский Я.А. (1985) Кристаллическая структура железистого шабазита при 293 и 570 К и ее сопоставление со структурами других природных шабазитов. *Кристаллография*, 30(5), 874–879.
- Бидный А.С., Бакшеев И.А., Попов М.П., Аносова М.О. (2011) Сравнительная характеристика берилла из месторождений уральской изумрудноносной полосы по данным ЛА–ИСП–МС- и ИК-спектроскопии. *Вестник Московского университета. Серия 4. Геология*, 2, 34–41.
- Брек Д. (1976) Цеолитовые молекулярные сита (пер. с англ.). М., Мир, 781 с.
- Власов К.А., Кутукова Е.И. (1960) Изумрудные копи. М., АН СССР, 251 с.
- Волошин А.В., Пахомовский Я.А., Белоконев Е.Л. (1986) Шабазиты необычного состава из гранитных пегматитов Кольского полуострова / Новые данные по минералогии магматических и метаморфических комплексов Кольского полуострова. Апатиты, Кольский филиал АН СССР, 87–91.

- Гаврильчик А.К., Скублов С.Г., Котова Е.Л. (2021) Особенности редкоэлементного состава берилла из Уральских изумрудных копей. *Минералогия*, 7(3), 32–46. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2021-7-3-2>
- Дампилова Б.В., Зонхоева Э.Л. (2019) ИК-спектроскопическое исследование природных цеолитов и их лантансодержащих форм. *Сорбционные и хроматографические процессы*, 19(1), 52–58. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2019.19/648>
- Жернаков В.И. (1985) Цеолиты восточной экзо-контактной полосы Адуйского массива / Минералы месторождений Южного и Среднего Урала. Свердловск, УНЦ АН СССР, 28–32.
- Жернаков В.И. (2009) Изумрудные копи Урала: заметки о минералогии. *Минералогический альманах*, 14(2), 128 с.
- Жернаков В.И. (2011) Изумрудные копи. Изумруд. Александрит. Фенацит. Онтогенез и филогения. Екатеринбург, УГГУ, 201 с.
- Житова Е.С., Попов М.П., Золотарёв А.А. мл. (2017) Цезийсодержащий анальцит Мариинского месторождения (Уральские изумрудные копи, Средний Урал, Россия) и его кристаллическая структура. *Записки Российского минералогического общества*, 146(4), 111–120.
- Золотухин Ф.Ф. (1996) Мариинское (Малышевское) месторождение изумруда, Средний Урал. СПб, СПбГУ, 70 с.
- Золотухин Ф.Ф., Жернаков В.И., Попов М.П. (2004) Геология и закономерности распределения драгоценных камней Малышевского месторождения (Уральские Изумрудные копи). *Уральская минералогическая школа-2004*. Екатеринбург, УГГГА, с. 75.
- Зонхоева Э.Л., Санжанова С.С. (2011) ИК-спектроскопическое исследование сорбции селена (IV) на природных цеолитах. *Журнал физической химии*, 85(7), 1339–1342.
- Панеш В.И., Наседкина В.Х., Наседкин В.В. (1967) Минералого-петрографическая характеристика и особенности дегидратации минералов группы цеолитов / Водные вулканические стекла и поствулканические минералы (о природе воды в вулканических стеклах и цеолитах и условиях цеолитообразования). М., Наука, 56–92.
- Пеков И.В., Турчкова А.Г., Ловская Е.В., Чуканов Н.В. (2004) Цеолиты щелочных массивов. М., Ассоциация Экост, 168 с.
- Пеков И.В., Турчкова А.Г., Чуканов Н.В., Задов А.Е., Гришин В.Г. (2000) Шабазит-Sr (Sr,Ca)[Al₂Si₄O₁₂]·6H₂O – новый цеолит из Ловозерского массива, Кольский полуостров. *Записки Российского минералогического общества*, 129(4), 54–58.
- Попов М.П. (2014) Геолого-минералогические особенности редкометальной минерализации в восточном экзоконтакте Адуйского массива в пределах уральской изумрудоносной полосы. Екатеринбург, УГГУ, 136 с.
- Попов М.П., Жернаков В.И., Золотухин Ф.Ф., Самсонов А.В. (1998) Уральские Изумрудные копи: история изучения, геологический очерк, минералогический кадастр, библиография. Екатеринбург, УГГУ, 76 с.
- Попова В.И., Попов В.А., Рассомахин М.А. (2023) Дополнения к составу уральских бериллов и о включениях в них сингенетичных минералов. *Минералогия*, 9(4), 5–16. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2023-9-4-1>
- Юхневич Г.В., Сендеров Э.Э. (1963) Изучение состояния воды в некоторых цеолитах. *Геохимия*, 1, 48–57.
- Юхневич Г.В., Карякин А.В., Хитаров Н.И., Сендеров Э.Э. (1961) Сравнительная характеристика некоторых цеолитов методом инфракрасной спектроскопии и форма связи воды в натролите. *Геохимия*, 10, 849–854.
- Якубович О.В., Масса В., Гавриленко П.Г., Пеков И.В. (2005) Кристаллическая структура шабазита-К. *Кристаллография*, 50(4), 595–604.
- Abtahi M., Fakhri Y., Sarafraz M., Keramati H., Conti G.O., Amanidaz N., Hosseini P.R., Moradi B.B., Baninameh Z. (2018) Removal of cesium through adsorption from aqueous solutions: a systematic review. *Journal of Advances in Environmental Health Research*, 6(2), 96–106. <https://doi.org/10.22102/jaehr.2018.104959.1048>
- Ames Jr. L.L. (1961) Cation sieve properties of the open zeolites chabazite, mordenite, erionite and clinoptilolite. *American Mineralogist*, 46(9–10), 1120–1131.
- Ames Jr. L.L. (1966) Alkali metal cation equilibria with chabazite. *The Canadian Mineralogist*, 8(5), 572–581.
- Aono H., Takeuchi Y., Itagaki Y., Johan E. (2020) Synthesis of chabazite and merlinoite for Cs⁺ adsorption and immobilization properties by heat-treatment. *Solid State Sciences*, 100, 106094. <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2019.106094>
- Aurischio C., Conte A.M., Medeghini L., Ottolini L., De Vito C. (2018) Major and trace element geochemistry of emerald from several deposits: Implications for genetic models and classification schemes. *Ore Geology Reviews*, 94, 351–366. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.02.001>
- Baek W., Ha S., Hong S., Kim S., Kim Y. (2018) Cation exchange of cesium and cation selectivity of natural zeolites: chabazite, stilbite, and heulandite. *Microporous and Mesoporous Materials*, 264, 159–166. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2018.01.025>
- Baerlocher Ch., McCusker L.B., Olson D.H. (2007) Atlas of zeolite framework types. Sixth revised edition. Amsterdam, Elsevier Science, 398 p.
- Barrer R.M. (1950) Ion-exchange and ion-sieve processes in crystalline zeolites. *Journal of the Chemical Society (Resumed)*, 2342–2350. <https://doi.org/10.1039/JR9500002342>
- Barrer R.M., Baynham J.W. (1956) Synthetic chabazites: correlation between isomorphous replacements, stability, and sorption capacity. *Journal of the Chemical*

- Society (Resumed)*, 2892–2903. <https://doi.org/10.1039/JR9560002892>
- Barrer R.M., Davies J.A., Rees L.V.C. (1969) Thermodynamics and thermochemistry of cation exchange in chabazite. *Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry*, 31(1), 219–232. [https://doi.org/10.1016/0022-1902\(69\)80071-0](https://doi.org/10.1016/0022-1902(69)80071-0)
- Barrer R.M., Sammon D.C. (1955) Exchange equilibria in crystals of chabazite. *Journal of the Chemical Society (Resumed)*, 2838–2849. <https://doi.org/10.1039/JR9550002838>
- Barrer R.M., Langley D.A. (1958) Reactions and stability of chabazite-like phases. Part I. Ion-exchanged forms of natural chabazite. *Journal of the Chemical Society (Resumed)*, 3804–3811. <https://doi.org/10.1039/JR9580003804>
- Barrer R.M., Bartholomew R.F., Rees L.V.C. (1963) Ion exchange in porous crystals part I. Self- and exchange-diffusion of ions in chabazites. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 24(1), 51–62. [https://doi.org/10.1016/0022-3697\(63\)90041-6](https://doi.org/10.1016/0022-3697(63)90041-6)
- Battsetseg B., Kim H.S., Choo H., Lim H.S., Nath S., Kim Y.H., Lim W.T. (2024) Exploring Mongolian natural zeolites as effective adsorbents for radioactive Cs and Sr. *Journal of Porous Materials*, 31(2), 747–758. <https://doi.org/10.1007/s10934-023-01553-w>
- Borai E.H., Harjula R., Paajanen A. (2009) Efficient removal of cesium from low-level radioactive liquid waste using natural and impregnated zeolite minerals. *Journal of Hazardous Materials*, 172(1), 416–422. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.07.033>
- Bosc D'Antic L. (1792) Mémoire sur la chabazie. *Journal d'Histoire Naturelle*, 2, 181–184. (in French)
- Breithaupt A. (1818) Ergänzungen und Berichtigungen zu dem applikativen Theil. *Handbuch der Mineralogie von C.A.S. Hoffmann*, 4(2). Freiberg, p. 41. (in German)
- Calligaris M., Mezzetti A., Nardin G., Randaccio L. (1986) Crystal structures of the hydrated and dehydrated forms of a partially cesium-exchanged chabazite. *Zeolites*, 6(2), 137–141. [https://doi.org/10.1016/S0144-2449\(86\)80012-4](https://doi.org/10.1016/S0144-2449(86)80012-4)
- Chaerun R.I., Soonthornwiphat N., Toda K., Kuroda K., Niu X., Kikuchi R., Otake T., Elakneswaran Y., Provis J.L., Sato T. (2022) Retention mechanism of cesium in chabazite embedded into metakaolin-based alkali activated materials. *Journal of Hazardous Materials*, 440, 29732. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129732>
- Chukanov N.V. (2014) Infrared spectra of mineral species. Extended Library. Volume 1. Dordrecht, Springer, 1726 p.
- Coombs D.S., Alberti A., Armbruster T., Artioli G., Colella C., Galli E., Grice J.D., Liebau F., Mandarino J.A., Minato H., Nickel E.H., Passaglia E., Peacor D.R., Quartieri S., Rinaldi R., Ross M., Sheppard R.A., Tillmanns E., Vezzali G. (1997) Recommended nomenclature for zeolite minerals; report of the Subcommittee on Zeolites of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names. *The Canadian Mineralogist*, 35(6), 1571–1606.
- de Gennaro B., Colella A., Aprea P., Colella C. (2003) Evaluation of an intermediate-silica sedimentary chabazite as exchanger for potentially radioactive cations. *Microporous and Mesoporous Materials*, 61(1–3), 159–165. [https://doi.org/10.1016/S1387-1811\(03\)00363-9](https://doi.org/10.1016/S1387-1811(03)00363-9)
- Dent L.S., Smith J.V. (1958) Crystal structure of chabazite, a molecular sieve. *Nature*, 181(4626), 1794–1796. <https://doi.org/10.1038/1811794b0>
- Đud'a R., Mrázek Z., Košuth M. (1984) Postmagmatická zeolitová mineralizácia Cerovej vrchoviny. *Mineralia Slovaca*, 16(2), 157–172. (in Slovak)
- Dyer A., Zubair M. (1998) Ion-exchange in chabazite. *Microporous and Mesoporous Materials*, 22(1–3), 135–150. [https://doi.org/10.1016/S1387-1811\(98\)00069-9](https://doi.org/10.1016/S1387-1811(98)00069-9)
- Ercit T.S., Groat L.A., Gault R.A. (2003) Granitic pegmatites of the O'Grady batholith, NWT, Canada: a case study of the evolution of the elbaite subtype of rare-element granitic pegmatite. *The Canadian Mineralogist*, 41(1), 117–137. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.41.1.117>
- Fan S., Jiang L., Jia Z., Yang Y., Hou L.A. (2023) Comparison of adsorbents for cesium and strontium in different solutions. *Separations*, 10(4), 266. <https://doi.org/10.3390/separations10040266>
- Figueiredo B.R., Cardoso S.P., Portugal I., Rocha J., Silva C.M. (2018) Inorganic ion exchangers for cesium removal from radioactive wastewater. *Separation Purification Reviews*, 47(4), 306–336. <https://doi.org/10.1080/15422119.2017.1392974>
- Fischer R.X., Kahlenberg V., Lengauer C.L., Tillmanns E. (2008) Thermal behavior and structural transformation in the chabazite-type zeolite willhendersonite, $\text{KCaAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{12} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$. *American Mineralogist*, 93(8–9), 1317–1325. <https://doi.org/10.2138/am.2008.2745>
- Gottardi G., Galli E. (1985) Natural zeolites. Minerals and Rocks Series, Vol. 18. Berlin, Springer, 409 p.
- Karampelas S., Al-Shaybani B., Mohamed F., Sangsawong S., Al-Alawi A. (2019) Emeralds from the most important occurrences: chemical and spectroscopic data. *Minerals*, 9(9), 561. <https://doi.org/10.3390/min9090561>
- Kawata N., Furuhashi R., Fujiwara K., Ohkawa M., Nakatsuka A. (2024) Single-crystal X-ray diffraction study of a largely Cs-exchanged natural Ca-chabazite: Crystal-chemical factors for its excellent Cs-exchange ability. *Microporous and Mesoporous Materials*, 379, 113262. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2024.113262>
- Kong M., Liu Z., Vogt T., Lee Y. (2016) Chabazite structures with Li^+ , Na^+ , Ag^+ , K^+ , NH_4^+ , Rb^+ and Cs^+ as extra-framework cations. *Microporous and Mesoporous Materials*, 221, 253–263. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2015.09.031>
- Lee K.-Y., Kim K.-W., Park M., Kim J., Oh M., Lee E.-H., Chung D.-Y., Moon, J.-K. (2016) Novel application of nanozeolite for radioactive cesium removal from high-salt wastewater. *Water Research*, 95, 134–141. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.02.052>

- Mazzi F., Galli E. (1983) The tetrahedral framework of chabazite. *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Monatshefte*, 10, 461–480.
- Mimura H., Kanno T. (1985) Distribution and fixation of cesium and strontium in zeolite A and chabazite. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 22(4), 284–291. <https://doi.org/10.1080/18811248.1985.9735658>
- Mimura H., Kimura M., Akiba K., Onodera Y. (1999) Selective removal of cesium from sodium nitrate solutions by potassium nickel hexacyanoferrate-loaded chabazites. *Separation Science and Technology*, 34(1), 17–28. <https://doi.org/10.1081/SS-100100633>
- Misaelides P., Sarri S., Kantiranis N., Noli F., Filippidis A., de Blochouse B., Maes A., Breynaert E. (2018) Investigation of chabazitic materials as Cs-137 sorbents from cementitious aqueous solutions. *Microporous and Mesoporous Materials*, 266, 183–188. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2018.02.048>
- Montagna G., Bigi S., Konya P., Szakall S., Vezzalini G. (2010) Chabazite-Mg: a new natural zeolite of the chabazite series. *American Mineralogist*, 95(7), 939–945. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3449>
- Pansini M. (1996) Natural zeolites as cation exchangers for environmental protection. *Mineralium Deposita*, 31(6), 563–575. <https://doi.org/10.1007/BF00196137>
- Parsons D.S., Nearchou A., Griffiths B.L., Ashbrook S.E., Hriljac J.A. (2024) Mechanistic insights into Cs-ion exchange in the zeolite chabazite from in situ powder X-ray diffraction. *The Journal of Physical Chemistry C*, 128(23), 9735–9741. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.4c02145>
- Passaglia E. (1970) The crystal chemistry of chabazites. *American Mineralogist*, 55(7–8), 1278–1301.
- Peacor D.R., Dunn P.J., Simmons W.B., Tillmanns E., Fischer R.X. (1984) Willhendersonite, a new zeolite isostructural with chabazite. *American Mineralogist*, 69(1–2), 186–189.
- Pechar F., Rykl D. (1983) Study of the complex vibrational spectra of natural zeolite chabazite. *Zeolites*, 3(4), 333–336. [https://doi.org/10.1016/0144-2449\(83\)90178-1](https://doi.org/10.1016/0144-2449(83)90178-1)
- Popov M.P., Solomonov V.I., Spirina A.V., Ivanov M.A., Kuptsova V.V., Nikolaev A.G. (2021) An analysis of geochemical features of crystallization of emeralds as an approach to determine the deposit of them. *Izvestiya UGGU (News of the Ural State Mining University)*, 62(2), 16–21. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2021-2-16-21>
- Toman J. (2011) Chování železa v přírodních zeolitech; Fe-bohatý chabazit ze Strzegomi. Diplomová práce. Brno, Masarykova univerzita v Brně (Přírodovědecká fakulta). 69 p. (in Czech)
- Toman J., Novák M. (2018) Textural relations and chemical composition of minerals from a pollucite + harmotome + chabazite nodule in the Věžná I pegmatite, Czech Republic. *The Canadian Mineralogist*, 56(4), 375–392. <https://doi.org/10.3749/canmin.1800014>
- von Born I. (1772) Lithophylacium bornianum, Prague, 157 p. (in Latin)
- Watanabe Y., Kawabata R., Taoka N., Kaneda T., Oshima S., Tamura K. (2022) Hydrothermal modification of chabazite for the fixation of cesium ions. *Journal of Ion Exchange*, 33(4), 122–126. <https://doi.org/10.5182/jaie.33.122>
- Wyart J. (1933) Recherches sur les zéolites. *Bulletin de la Société française de Minéralogie*, 56(4–5), 81–187. <https://doi.org/10.3406/bulmi.1933.4167>
- Yang H.M., Park C.W., Kim I., Yoon I.H., Sohn Y. (2021) Sulfur-modified chabazite as a low-cost ion exchanger for the highly selective and simultaneous removal of cesium and strontium. *Applied Surface Science*, 536, 147776. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.147776>
- Zhang L., Ren Z., Dong X., Zhao Y., Cen Q. (2023) Fabrication of hierarchically porous CHA-type zeolite composites derived from industrial solid waste for cesium removal. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 106(2), 602–615. <https://doi.org/10.1007/s10971-023-06038-5>
- Zheng Y.-Y., Yu X.-Y., Xu B., Gao Y.-J. (2024) Characterizing Malysheva emeralds (Urals, Russia) by microscopy, spectroscopy, trace element chemistry, and machine learning. *Crystals*, 14(8), paper 683. <https://doi.org/10.3390/cryst14080683>

REFERENCES

- Abtahi M., Fakhri Y., Sarafraz M., Keramati H., Conti G.O., Amanidaz N., Hosseini P.R., Moradi B.B., Baninameh Z. (2018) Removal of cesium through adsorption from aqueous solutions: a systematic review. *Journal of Advances in Environmental Health Research*, 6(2), 96–106. <https://doi.org/10.22102/jaehr.2018.104959.1048>
- Ames Jr. L.L. (1961) Cation sieve properties of the open zeolites chabazite, mordenite, erionite and clinoptilolite. *American Mineralogist*, 46(9–10), 1120–1131.
- Ames Jr. L.L. (1966) Alkali metal cation equilibria with chabazite. *The Canadian Mineralogist*, 8(5), 572–581.
- Aono H., Takeuchi Y., Itagaki Y., Johan E. (2020) Synthesis of chabazite and merlinoite for Cs⁺ adsorption and immobilization properties by heat-treatment. *Solid State Sciences*, 100, 106094. <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2019.106094>
- Arkhipenko D.K., Valueva G.P., Moroz T.N. (1995) Determination of the space group of chabazite. *Journal of Structural Chemistry*, 36(1), 171–174. <https://doi.org/10.1007/BF02577766>
- Aurisicchio C., Conte A.M., Medeghini L., Ottoloni L., De Vito C. (2018) Major and trace element geochemistry of emerald from several deposits: Implications for genetic models and classification schemes. *Ore Geology Reviews*, 94, 351–366. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.02.001>
- Baek W., Ha S., Hong S., Kim S., Kim Y. (2018) Cation exchange of cesium and cation selectivity of natural zeolites: chabazite, stilbite, and heulandite. *Microporous and Mesoporous Materials*, 264, 159–166. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2018.01.025>

- Baerlocher Ch., McCusker L.B., Olson D.H. (2007) Atlas of zeolite framework types. Sixth revised edition. Amsterdam, Elsevier Science, 398 p.
- Barrer R.M. (1950) Ion-exchange and ion-sieve processes in crystalline zeolites. *Journal of the Chemical Society (Resumed)*, 2342–2350. <https://doi.org/10.1039/JR9500002342>
- Barrer R.M., Baynham J.W. (1956) Synthetic chabazites: correlation between isomorphous replacements, stability, and sorption capacity. *Journal of the Chemical Society (Resumed)*, 2892–2903. <https://doi.org/10.1039/JR9560002892>
- Barrer R.M., Langley D.A. (1958) Reactions and stability of chabazite-like phases. Part I. Ion-exchanged forms of natural chabazite. *Journal of the Chemical Society (Resumed)*, 3804–3811. <https://doi.org/10.1039/JR9580003804>
- Barrer R.M., Sammon D.C. (1955) Exchange equilibria in crystals of chabazite. *Journal of the Chemical Society (Resumed)*, 2838–2849. <https://doi.org/10.1039/JR9550002838>
- Barrer R.M., Bartholomew R.F., Rees L.V.C. (1963) Ion exchange in porous crystals part I. Self- and exchange-diffusion of ions in chabazites. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 24(1), 51–62. [https://doi.org/10.1016/0022-3697\(63\)90041-6](https://doi.org/10.1016/0022-3697(63)90041-6)
- Barrer R.M., Davies J.A., Rees L.V.C. (1969) Thermodynamics and thermochemistry of cation exchange in chabazite. *Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry*, 31(1), 219–232. [https://doi.org/10.1016/0022-1902\(69\)80071-0](https://doi.org/10.1016/0022-1902(69)80071-0)
- Battsetseg B., Kim H.S., Choo H., Lim H.S., Nath S., Kim Y.H., Lim W.T. (2024) Exploring Mongolian natural zeolites as effective adsorbents for radioactive Cs and Sr. *Journal of Porous Materials*, 31(2), 747–758. <https://doi.org/10.1007/s10934-023-01553-w>
- Belitskiy I.A., Golubova G.A. (1972) Infrared spectra of natural zeolites. *Materialy po geneticheskoy i eksperimental'noy mineralogii (Materials on Genetic and Experimental Mineralogy)*, 7, 310–322. (in Russian)
- Belokoneva E.L., Maksimov B.A., Verin I.A., Sirota M.I., Voloshin A.V., Pakhomovsky Ya.A. (1985) Crystal structure of ferrous chabazite at 293 and 570 K and its comparison with the structures of other natural chabazites. *Soviet Physics, Crystallography*, 30(5), 507–510.
- Bidnyy A.S., Baksheev I.A., Popov M.P., Anosova M.O. (2011) Beryl from deposits of the Ural Emerald belt, Russia: ICP–MS–LA and infrared spectroscopy study. *Moscow University Geology Bulletin*, 2, 108–115. <https://doi.org/10.3103/S0145875211020037>
- Borai E.H., Harjula R., Paajanen A. (2009) Efficient removal of cesium from low-level radioactive liquid waste using natural and impregnated zeolite minerals. *Journal of Hazardous Materials*, 172(1), 416–422. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.07.033>
- Bosc D'Antic L. (1792) Mémoire sur la chabazie. *Journal d'Histoire Naturelle*, 2, 181–184. (in French)
- Breck D.W. (1974) Zeolite molecular sieves: structure, chemistry, and use. New York, John Wiley & Sons, 771 p.
- Breithaupt A. (1818) Ergänzungen und Berichtigungen zu dem applikativen Theil. *Handbuck der Mineralogie von C.A.S. Hoffmann*, 4(2). Freiberg, p. 41. (in German)
- Calligaris M., Mezzetti A., Nardin G., Randaccio L. (1986) Crystal structures of the hydrated and dehydrated forms of a partially cesium-exchanged chabazite. *Zeolites*, 6(2), 137–141. [https://doi.org/10.1016/S0144-2449\(86\)80012-4](https://doi.org/10.1016/S0144-2449(86)80012-4)
- Chaerun R.I., Soonthornwiphat N., Toda K., Kuroda K., Niu X., Kikuchi R., Otake T., Elakneswaran Y., Provis J.L., Sato T. (2022) Retention mechanism of cesium in chabazite embedded into metakaolin-based alkali activated materials. *Journal of Hazardous Materials*, 440, 29732. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129732>
- Chukanov N.V. (2014) Infrared spectra of mineral species. Extended Library. Volume 1. Dordrecht, Springer. 1726 p.
- Coombs D.S., Alberti A., Armbruster T., Artio-li G., Colella C., Galli E., Grice J.D., Liebau F., Mandarino J.A., Minato H., Nickel E.H., Passaglia E., Peacor D.R., Quartieri S., Rinaldi R., Ross M., Sheppard R.A., Tillmanns E., Vezzalini G. (1997) Recommended nomenclature for zeolite minerals; report of the Subcommittee on Zeolites of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names. *The Canadian Mineralogist*, 35(6), 1571–1606.
- Dampilova B.V., Zonkhoeva E.L. (2019) IR spectroscopic research of natural zeolites and their lanthanum-containing forms. *Sorbcionnye i khromatograficheskie processy (Sorption and Chromatographic Processes)*, 19(1), 52–58. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2019.19/648> (in Russian)
- de Gennaro B., Colella A., Aprea P., Colella C. (2003) Evaluation of an intermediate-silica sedimentary chabazite as exchanger for potentially radioactive cations. *Microporous and Mesoporous Materials*, 61(1–3), 159–165. [https://doi.org/10.1016/S1387-1811\(03\)00363-9](https://doi.org/10.1016/S1387-1811(03)00363-9)
- Dent L.S., Smith J.V. (1958) Crystal structure of chabazite, a molecular sieve. *Nature*, 181(4626), 1794–1796. <https://doi.org/10.1038/1811794b0>
- Đud'a R., Mrázek Z., Košuth M. (1984) Postmagmatická zeolitová mineralizácia Cerovej vrchoviny. *Mineralia Slovaca*, 16(2), 157–172. (in Slovak)
- Dyer A., Zubair M. (1998) Ion-exchange in chabazite. *Microporous and Mesoporous Materials*, 22(1–3), 135–150. [https://doi.org/10.1016/S1387-1811\(98\)00069-9](https://doi.org/10.1016/S1387-1811(98)00069-9)
- Ercit T.S., Groat L.A., Gault R.A. (2003) Granitic pegmatites of the O'Grady batholith, NWT, Canada: a case study of the evolution of the elbaite subtype of rare-element granitic pegmatite. *The Canadian Mineralogist*, 41(1), 117–137. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.41.1.117>
- Fan S., Jiang L., Jia Z., Yang Y., Hou L.A. (2023) Comparison of adsorbents for cesium and strontium in

- different solutions. *Separations*, 10(4), 266. <https://doi.org/10.3390/separations10040266>
- Figueiredo B.R., Cardoso S.P., Portugal I., Rocha J., Silva C.M. (2018) Inorganic ion exchangers for cesium removal from radioactive wastewater. *Separation Purification Reviews*, 47(4), 306–336. <https://doi.org/10.1080/15422119.2017.1392974>
- Fischer R.X., Kahlenberg V., Lengauer C.L., Tillmanns E. (2008) Thermal behavior and structural transformation in the chabazite-type zeolite willhendersonite, $\text{KCaAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{12} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$. *American Mineralogist*, 93(8–9), 1317–1325. <https://doi.org/10.2138/am.2008.2745>
- Gavrilchik A.K., Skublov S.G., Kotova E.L. (2021) Features of trace element composition of beryl from the Uralian Izumrudnye kopi. *Mineralogiya (Mineralogy)*, 7(3), 32–46. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2021-7-3-2> (in Russian)
- Gottardi G., Galli E. (1985) Natural zeolites. Minerals and Rocks Series, Vol. 18. Berlin, Springer, 409 p.
- Karampelas S., Al-Shaybani B., Mohamed F., Sangsawong S., Al-Alawi A. (2019) Emeralds from the most important occurrences: chemical and spectroscopic data. *Minerals*, 9(9), 561. <https://doi.org/10.3390/min9090561>
- Kawata N., Furuhashi R., Fujiwara K., Ohkawa M., Nakatsuka A. (2024) Single-crystal X-ray diffraction study of a largely Cs-exchanged natural Ca-chabazite: Crystal-chemical factors for its excellent Cs-exchange ability. *Microporous and Mesoporous Materials*, 379, 113262. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2024.113262>
- Kong M., Liu Z., Vogt T., Lee Y. (2016) Chabazite structures with Li^+ , Na^+ , Ag^+ , K^+ , NH_4^+ , Rb^+ and Cs^+ as extra-framework cations. *Microporous and Mesoporous Materials*, 221, 253–263. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2015.09.031>
- Lee K.-Y., Kim K.-W. Park M., Kim J., Oh M., Lee E.-H., Chung D.-Y., Moon, J.-K. (2016) Novel application of nanozeolite for radioactive cesium removal from high-salt wastewater. *Water Research*, 95, 134–141. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.02.052>
- Mazzi F., Galli E. (1983) The tetrahedral framework of chabazite. *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Monatshefte*, 10, 461–480.
- Mimura H., Kanno T. (1985) Distribution and fixation of cesium and strontium in zeolite A and chabazite. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 22(4), 284–291. <https://doi.org/10.1080/18811248.1985.9735658>
- Mimura H., Kimura M., Akiba K., Onodera Y. (1999) Selective removal of cesium from sodium nitrate solutions by potassium nickel hexacyanoferrate-loaded chabazites. *Separation Science and Technology*, 34(1), 17–28. <https://doi.org/10.1081/SS-100100633>
- Misaelides P., Sarri S., Kantiranis N., Noli F., Filippidis A., de Blohouse B., Maes A., Breynaert E. (2018) Investigation of chabazitic materials as Cs-137 sorbents from cementitious aqueous solutions. *Microporous and Mesoporous Materials*, 266, 183–188. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2018.02.048>
- Montagna G., Bigi S., Konya P., Szakall S., Vezzalini G. (2010) Chabazite-Mg: a new natural zeolite of the chabazite series. *American Mineralogist*, 95(7), 939–945. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3449>
- Panesh V.I., Nasedkina V.Kh., Nasedkin V.V. (1967) Mineralogical and petrographical characteristics and features of zeolite group minerals dehydration. In: Water Volcanic Glasses and Post-Volcanic Minerals (about Nature of Water in Volcanic Glasses and Zeolites and Their Formation Conditions). Moscow, Nauka, 56–92. (in Russian)
- Pansini M. (1996) Natural zeolites as cation exchangers for environmental protection. *Mineralium Deposita*, 31(6), 563–575. <https://doi.org/10.1007/BF00196137>
- Parsons D.S., Nearchou A., Griffiths B.L., Ashbrook S.E., Hriljac J.A. (2024) Mechanistic insights into Cs-ion exchange in the zeolite chabazite from in situ powder X-ray diffraction. *The Journal of Physical Chemistry C*, 128(23), 9735–9741. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.4c02145>
- Passaglia E. (1970) The crystal chemistry of chabazites. *American Mineralogist*, 55(7–8), 1278–1301.
- Peacor D.R., Dunn P.J., Simmons W.B., Tillmanns E., Fischer R.X. (1984) Willhendersonite, a new zeolite isostructural with chabazite. *American Mineralogist*, 69(1–2), 186–189.
- Pechar F., Rykl D. (1983) Study of the complex vibrational spectra of natural zeolite chabazite. *Zeolites*, 3(4), 333–336. [https://doi.org/10.1016/0144-2449\(83\)90178-1](https://doi.org/10.1016/0144-2449(83)90178-1)
- Pekov I.V., Turchkova A.G., Chukanov N.V., Zadorov A.E., Grishin V.G. (2000) Chabazite-Sr (Sr, Ca) $[\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{12}] \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, a new zeolite mineral from Lovozero massif, Kola peninsula. *Zapiski Rossiyskogo mineralogicheskogo obshchestva (Proceedings of the Russian Mineralogical Society)*, 129(4), 54–58. (in Russian)
- Pekov I.V., Turchkova A.G., Lovskaya E.V., Chukanov N.V. (2004) *Zeolites of alkaline massifs*. Moscow, Assotsiatsiya Ekost, 168 p. (in Russian)
- Popov M.P. (2014) Geological and mineralogical features of rare-metal mineralization in the eastern contact of the Aduy pluton within the Ural Emerald Belt. Yekaterinburg, UGGU, 136 p. (in Russian)
- Popov M.P., Zhernakov V.I., Zolotukhin F.F., Samsonov A.V. (1998) Ural Emerald mines: history of study, geology, mineral cadaster, bibliography. Yekaterinburg, UGGA, 90 p. (in Russian)
- Popov M.P., Zhernakov V.I., Zolotukhin F.F., Samsonov A.V. (2008) Ural Emerald mines: history of study, geology, mineral cadaster, bibliography. 2nd edition. Yekaterinburg, UGGU, 76 p. (in Russian)
- Popov M.P., Solomonov V.I., Spirina A.V., Ivanov M.A., Kuptsova V.V., Nikolaev A.G. (2021) An analysis of geochemical features of crystallization of emeralds as an approach to determine the deposit of them. *Izvestiya UGGU (News of the Ural State Mining University)*, 62(2), 16–21. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2021-2-16-21>
- Popova V.I., Popov V.A., Rassomakhin M.A. (2023) Supplementary to the composition of the Ural beryls and inclusions of syngenetic minerals in them. *Mineralogiya*

(*Mineralogy*), 9(4), 5–16. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2023-9-4-1> (in Russian)

Toman J. (2011) Chování železa v přírodních zeolitech; Fe-bohatý chabazit ze Strzegomi. Diplomová práce. Brno, Masarykova univerzita v Brně (Přírodovědecká fakulta). 69 p. (in Czech)

Toman J., Novák M. (2018) Textural relations and chemical composition of minerals from a pollucite + harmotome + chabazite nodule in the Věžná I pegmatite, Czech Republic. *The Canadian Mineralogist*, 56(4), 375–392. <https://doi.org/10.3749/canmin.1800014>

Vlasov K.A., Kutukova E.I. (1960) Emerald mines. Moscow, AN SSSR, 251 p. (in Russian)

Voloshin A.V., Pakhomovsky Ya.A., Belokoneva E.L. (1986) Unusual composition chabazites from granitic pegmatites of the Kola Peninsula. In: *Novye dannye po mineralologii magmaticeskikh i metamorficheskikh komplexov Kol'skogo poluostrova (New Data on Mineralogy of Igneous and Metamorphic Complexes of the Kola Peninsula)*. Apatity, Kolsky filial AN SSSR, 87–91. (in Russian)

von Born I. (1772) Lithophylacium bornianum, Prague. 157 p. (in Latin)

Watanabe Y., Kawabata R., Taoka N., Kaneda T., Oshima S., Tamura K. (2022) Hydrothermal modification of chabazite for the fixation of cesium ions. *Journal of Ion Exchange*, 33(4), 122–126. <https://doi.org/10.5182/jaie.33.122>

Wyart J. (1933) Recherches sur les zéolites. *Bulletin de la Société française de Minéralogie*, 56(4–5), 81–187. <https://doi.org/10.3406/bulmi.1933.4167>

Yakubovich O.V., Massa W., Gavrilenko P.G., Pekov I.V. (2005) Crystal structure of chabazite -K. *Crystallography Reports*, 50(4), 544–553. <https://doi.org/10.1134/1.1996728>

Yang H.M., Park C.W., Kim I., Yoon I.H., Sohn Y. (2021) Sulfur-modified chabazite as a low-cost ion exchanger for the highly selective and simultaneous removal of cesium and strontium. *Applied Surface Science*, 536, 147776. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.147776>

Yukhnovich G.V., Senderov E.E. (1963) Study of water condition in some zeolites. *Geokhimiya (Geochemistry)*, 1, 48–57. (in Russian)

Yukhnovich G.V., Karyakin A.V., Khitarov N.I., Senderov E.E. (1961) Comparative characteristics of some zeolites using infrared spectroscopy and the water bond in natrolite. *Geokhimiya (Geochemistry)*, 10, 849–854. (in Russian)

Zhang L., Ren Z., Dong X., Zhao Y., Cen Q. (2023) Fabrication of hierarchically porous CHA-type zeolite composites derived from industrial solid waste for cesium removal. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 106(2), 602–615. <https://doi.org/10.1007/s10971-023-06038-5>

Zheng Y.-Y., Yu X.-Y., Xu B., Gao Y.-J. (2024) Characterizing Malysheva emeralds (Urals, Russia) by microscopy, spectroscopy, trace element chemistry, and machine learning. *Crystals*, 14(8), paper 683. <https://doi.org/10.3390/cryst14080683>

Zhernakov V.I. (1985) Zeolites of the eastern contact band of the Aduy pluton. In: *Minerals of the South and Middle Ural deposits*. Sverdlovsk, UNTs AN SSSR, 28–32. (in Russian)

Zhernakov V.I. (2009) Ural Emerald mines: notes on mineralogy. *Mineralogical Almanac*, 14(2), 128 p.

Zhernakov V.I. (2011) Emerald mines. Emerald. Alexandrite. Phenakite. Ontogeny and phylogeny. Yekaterinburg, UGGU, 201 p. (in Russian)

Zhitova E.S., Popov M.P., Zolotarev A.A., jr. (2017) Analcime of the Mariinskoe deposit (Urals Emerald mines, the Middle Urals): chemical composition and crystal structure. *Zapiski Rossiyskogo mineralogicheskogo obshchestva (Proceedings of the Russian Mineralogical Society)*, 146(4), 111–120. (in Russian)

Zolotukhin F.F. (1996) Mariinskoe (Malyshevskoe) emerald deposit, Middle Urals. St. Petersburg, SPbGU, 70 p. (in Russian)

Zolotukhin F.F., Zhernakov V.I., Popov M.P. (2004) Geology and precious stones distribution patterns of the Malyshevskoe deposit (Ural Emerald mines). *Ura'skaya mineralogicheskaya shkola-2004 (Ural Mineralogical School-2004)*. Yekaterinburg, UGGA, p. 75 (in Russian)

Zonkhoeva E.L., Sanzhanova S.S. (2011) Infrared spectroscopy study of the sorption of selenium(IV) on natural zeolites. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 85(7), 1233–1236. <https://doi.org/10.1134/S0036024411070399>

Информация об авторах

Карпов Андрей Олегович – аспирант, Московский государственный университет, г. Москва, Россия; музейный хранитель, Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН, г. Москва, Россия; karpovao@my.msu.ru

Агаханов Атали Акмурадович – кандидат геолого-минералогических наук, заместитель директора по научной работе, Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН, г. Москва, Россия; atali99@mail.ru

Information about the authors

Andrey O. Karpov – Graduate Student, Moscow State University, Moscow, Russia; Museum Curator, Fersman Mineralogical Museum RAS, Moscow, Russia; karpovao@my.msu.ru

Atali A. Agakhanov – Cand. Sci. (Geol.-Mineral.), Deputy Director, Fersman Mineralogical Museum RAS, Moscow, Russia; atali99@mail.ru