



УДК 543.544

Исследование природных лантансодержащих цеолитов методом растровой электронной микроскопии

Дампилова Б.В., Зонхоева Э.Л.

ФГБУН Геологический институт Сибирского отделения Российской академии наук, Улан-Удэ

Поступила в редакцию 3.10.2018 г.

DOI: <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2019.19/738>

Методами растровой электронной микроскопии и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии установлено распределение ионов лантана в структуре природных цеолитов – стильбита, шабазита, анальцима, мезолита. Показано, что ионы лантана по поверхности зерна цеолита локализованы неравномерно, концентрируясь на различных структурных дефектах в составе кристаллической фазы.

Ключевые слова: стильбит, анальцим, шабазит, мезолит, лантан, растровая электронная микроскопия, энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия.

Investigation of natural lanthane-containing zeolites by the method of raster electronic microscopy

Dampilova B.V., Zonkhoeva E.L.

Geological Institute Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude

This paper presents the results of the study of lanthanum-containing forms of natural zeolites (stilbit, analcime, shabazite, mesolite) using scanning electron microscopy and energy dispersive X-ray spectroscopy. In order to study the sorption properties of monominerals of zeolites, the distribution of lanthanum ions in the structure of natural zeolites and on their surface was studied. To obtain a cut image of the samples, thin sections were prepared by pouring sorbent grains into epoxy resin, followed by grinding and mechanical polishing with a diamond paste. In electron microscopic photographs of a slice of zeolite grains, an insignificant content of lanthanum is established at local sites. SEM studies of the surface of the grains revealed the concentration of lanthanum ions in the form of clusters, aggregates of rather large sizes, unevenly distributed to a greater extent on the gaps and roughnesses. It is assumed that the deposition of lanthanum ions on the surface of zeolites is associated with the manifestation of the ion-sieve effect due to the obstruction into the pores of the zeolites of large lanthanum complex compounds. The lanthanum aquacomplex binds to the aluminosilicate surface of the zeolite due to oxygen atoms to form hydrogen bonds. A similar formation on the surface of zeolites of the crystalline phase of lead, copper, silver is described in the work of D. Breck. Its appearance is explained by the destabilization of metal ions in the zeolitic structure, as a result of which metal cations diffuse to the surface of the zeolite and agglomerate into small crystallites. The formation of various aggregations on the surface of zeolite grains can also be explained by the Fayans – Peskov – Paneth rule. According to this rule, those ions that are capable of completing the crystal lattice, are isomorphic or form poorly soluble compounds with ions entering the crystal lattice are predominantly adsorbed on the surface of a solid.

Thus, electron microscopic examination and energy dispersive analysis of the elemental composition of natural zeolites made it possible to establish a predominantly surface, uneven distribution of lanthanum ions. On the surface of the monomineral zeolite grains, lanthanum ions are found in the composition of the crystalline phase localized at various structural defects. The qualitative composition of the aggregations re-

vealed only lanthanum atoms. It is assumed that lanthanum ions concentrate on the surface of zeolites in the form of aqua and hydroxo complexes.

Keywords: stilbite, analcime, chabazite, mesolithic, lanthanum, scanning electron microscopy, energy dispersive X-ray spectroscopy.

Введение

Растровая электронная микроскопия (РЭМ) позволяет увидеть множество деталей строения минералов, изучить кристаллическую огранку микрокристаллов, получить качественную информацию по распределению модифицирующих и основных элементов цеолита (Al, Si, Ca, K, Fe, Mg и др.) во внутренней структуре и на поверхности минерала. Строение природных цеолитизированных туфов с помощью сканирующей электронной микроскопии впервые рассмотрено в работе Челищева Н.Ф. [1], в которой установлено многоуровневое строение цеолитов, связанное с образованием микрожеод за счет микрокристаллизации агрегированных микрокристаллитов с участием жидкой фазы на стадии формирования туфа. Современные исследования в области изучения микро- и ультраструктуры поверхности частиц природного цеолита в сочетании с энергодисперсионным определением элементного состава были рассмотрены на примере цеолитсодержащих пород Тербунского месторождения [2]. Хатьковой А.Н. [3] описана морфология и взаиморасположение минеральных агрегатов Холинских цеолитсодержащих туфов Забайкалья.

Ранее нами [4] исследовано с помощью сканирующего электронного микроскопа внутреннее строение лантансодержащих форм клиноптилолитового туфа Холинского месторождения. Электронно-микроскопическое изображение среза зерна клиноптилолитового туфа выявило преимущественное распределение ионов лантана в его рыхлой структуре. Предпочтительная локализация ионов лантана в рыхлой структуре туфа связано с большей ее доступностью за счет имеющихся в ней пустот. Диффундировавшие ионы лантана могут подвергнуться, предположительно, микроосаждению в порах свободными гидроксоионами кремния, алюминия, железа, образующимися при гидролизе цеолитсодержащего туфа. В работе [5] изучено взаимодействие селенита натрия с клиноптилолитовым туфом Холинского месторождения. На поверхности туфа обнаружены кристаллы селенита кальция в виде агрегатов дендритовой формы. Результаты микрозондового анализа показали сосредоточение наибольшего количества селена в локальных участках поверхности туфа с наименьшим содержанием алюминия и кремния и с наибольшим количеством кальция. Было предположено, что рост кристаллов начинается с диффузии обменных катионов кальция к поверхности зерна, где происходит их связывание с селенит-ионами. Кристаллы молибдата кальция были обнаружены при изучении молибденсодержащих морденитовых туфов Мухор-Талинского месторождения [6]. Известно, что одними из условий зарождения, роста и агрегирования веществ из растворов являются пересыщение среды и взаимное притяжение частиц [7]. Так, нуклеация и рост кристаллов может проходить в порах, на поверхности адсорбентов и пористых систем. Шутиловым Р.А. с соавт. [8], исследовавшими природу и распределение медьсодержащих компонентов в пористой структуре цеолита ZSM-5, установлено нахождение ионов меди в изолированном состоянии в каналах цеолита, а на внешней поверхности цеолита в виде кластеров ионов меди.

Целью настоящей работы являлось исследование распределения ионов лантана в структуре природных цеолитов и на их поверхности методами растровой электронной микроскопии и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии.

Эксперимент

В работе использованы лантансодержащие мономинеральные фракции природных цеолитов – шабазита, стильбита, анальцима, мезолита, выделенные из базальтоидов Маргинтуйского вулканического поля [9]. Лантансодержащая фракция мономинералов получена по методике ионного обмена в статических условиях [10] при концентрации контактирующего раствора 0.03 моль/дм³ LaNO₃·6H₂O. Время контакта твердой и жидкой фаз составляла 24 часа, масса навески 0.5 г, объем раствора 25 см³, температура 20°C, диаметр зерен 1-2 мм. Отделение твердой фазы от жидкой было произведено при помощи центрифугирования.

Анализ лантана в фазе сорбентов проводился атомно-эмиссионным (ЦКП «Аналитический центр минералого-геохимических и изотопных исследований» ГИН СО РАН) и рентгенофлуоресцентным (Аналитический центр ОАО «Иргиредмет») методами, в растворах – фотометрическим методом с арсеназо III. Макро- и микрокомпонентный состав цеолитов определялся в лаборатории физико-химических методов анализа ГИН СО РАН (табл. 1). Анализ SiO₂, Al₂O₃, произведен фотометрическим; CaO, MgO, Fe₂O₃ атомно-абсорбционным; Na₂O, K₂O пламенно-фотометрическим методами.

Таблица 1. Химический состав природных мономинералов цеолитов, (%).

| Цеолит | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O |
|----------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|-------------------|------------------|
| Шабазит | 51.0 | 19.8 | 0.03 | 0.14 | 9.76 | 0.35 | 0.29 |
| Мезолит | 44.8 | 26.4 | 0.04 | 0.07 | 9.61 | 5.57 | 0.03 |
| Анальцим | 54.9 | 21.5 | < 0.01 | 0.02 | 4.41 | 10.9 | 0.09 |
| Стильбит | 55.3 | 17.4 | < 0.01 | 0.08 | 8.00 | 1.22 | 0.61 |
| Сколецит | 46.7 | 24.9 | <0.01 | 0.06 | 10.1 | 4.74 | 0.06 |

Для изучения микроморфологии минералов и распределения ионов лантана как на поверхности, так и в срезах зерен цеолитов использовался растровый электронный микроскоп LEO 1430VP (Carl Zeiss, Германия) с энергодисперсионным анализатором INCAEnergy 350 (Oxford Instruments) в ЦКП «Аналитический центр минералого-геохимических и изотопных исследований» ГИН СО РАН. Съёмка образцов цеолитов в сухом состоянии проводилась в высоковакуумном режиме с использованием детекторов обратно рассеянных электронов. Подготовка проб произведена в соответствии с методиками [11, 12]. Для получения изображения среза образцов готовили шлифы путем заливки в эпоксидную смолу зерен сорбента с последующей шлифовкой и механической полировкой с помощью алмазной пасты.

Обсуждение результатов

На РЭМ-изображении среза зерна стильбита (рис. 1) незначительное содержание лантана установлено на микроучастках в точках 26, 28, 30, 34. По краям зерна в точках 2-8, 10-12, 15, 16, 21-23 лантан присутствует в больших количествах. Аналогичная картина была получена для остальных минералов: лантан присутствует на всех образцах по краям среза зерен. Вероятно, крупные ионы лантана ввиду непроницаемости в поры цеолитов осаждаются на поверхности зерен цеолитов вследствие проявления ионно-ситового эффекта, отмеченного в работе [13]. Известно, что в водных нитратных растворах ионы лантана находятся в виде крупных по размеру комплексных соединений (La(H₂O)_n)³⁺, (La(H₂O)_nOH)²⁺, где n=5-8 [14].

Электронно-микроскопические снимки поверхности зерна шабазита свидетельствуют о высокой концентрации ионов лантана в виде скоплений на различ-

ных дефектах структуры, в том числе щелях (рис. 2а, табл. 2). При увеличении до 2500 раз поверхности зерна шабазита лантан обнаружен в составе кристаллической фазы (рис. 2б), концентрирующейся на поверхностных дефектах цеолита. По К. Оура [15], общим условием для выделения кристаллов из растворов является наличие пересыщения и взаимного притяжения атомов металлов. Известно, что нуклеация и рост кристаллов из отдельных атомов может проходить в порах, на поверхности адсорбентов и пористых систем. Эти вещества имеют тенденцию концентрироваться в поверхностном слое, уменьшая поверхностное натяжение [16]. При этом количество лантана коррелирует со степенью выщелачивания цеолита. Шабазит преимущественно кальциевый минерал с незначительным содержанием натрия и калия. Отношение Si/Al по выделенным участкам (табл. 2) в среднем равно 2.71.

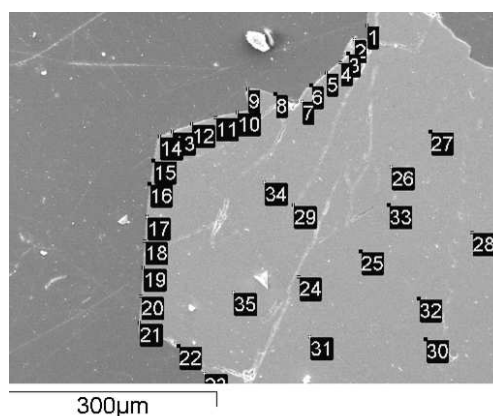


Рис. 1. РЭМ-изображение среза зерна лантансодержащего стильбита

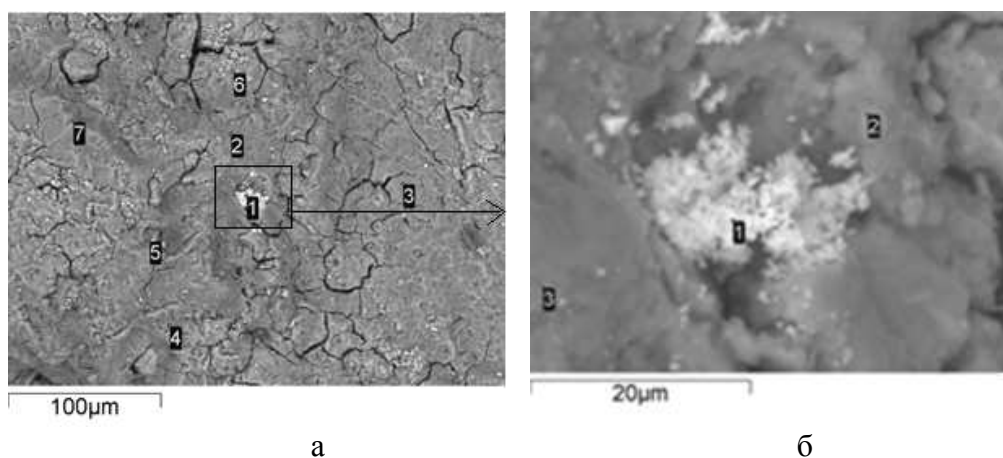


Рис. 2. Микрофотографии поверхности зерна La-формы шабазита при кратности увеличения 500х (а) и 2500х (б).

Таблица 2. Элементный состав поверхности зерна шабазита

| № | Концентрация, мас. % | | | | | | |
|---|----------------------|------|------|------|------|------|------|
| | Na | Mg | Al | Si | K | Ca | La |
| 1 | - | 1.30 | 5.99 | 15.5 | - | 2.57 | 65.4 |
| 2 | 0.55 | 2.32 | 21.9 | 61,2 | 3.74 | 6.24 | 4.08 |
| 3 | - | 6.29 | 16.1 | 48.7 | 1.89 | 4.67 | 18.0 |
| 4 | - | 2.78 | 18.7 | 56.7 | 2.71 | 12.1 | 7.09 |
| 5 | - | 1.10 | 7.94 | 18.9 | 0.71 | 6.47 | - |
| 6 | 0.46 | 3.45 | 7.62 | 19.7 | 0.36 | 30.9 | 1.08 |
| 7 | 0.96 | 1.84 | 24.0 | 62.4 | 3.05 | 7.74 | - |

Стильбит имеет вид уплощенных пластинчатых кристаллов и сростков параллельно-листоватой формы (рис. 3). Он представляет собой катионнообменный комплекс натрий-кальциевый состава $(\text{Na}_2\text{Ca}_4[(\text{AlO}_2)_{10}(\text{SiO}_2)_{26}]\cdot 28\text{H}_2\text{O})$, отношение Si/Al в среднем равно 3.48, что согласуется с литературными (2.5-3.8) данными [13, 17]. Ионы лантана в небольшом количестве встречаются в точках № 1, 3-5 (табл. 3), представляющих собой микротрещины. Отмечается заметное уменьшение содержания элементов Si, Al, Na, Ca в результате выщелачивания стильбита.

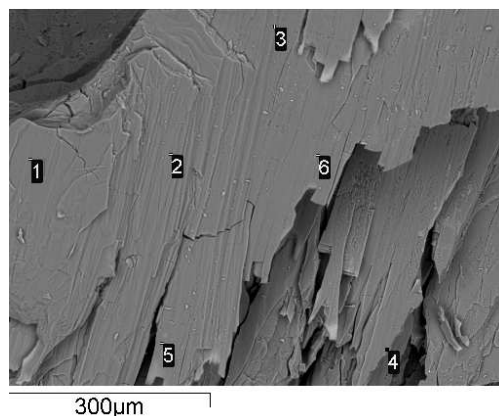


Рис. 3. РЭМ-изображение поверхности зерна La-формы стильбита

Таблица 3. Элементный состав поверхности зерна стильбита

| № | Концентрация, мас. % | | | | | |
|---|----------------------|------|------|------|------|------|
| | Na | Al | Si | Ca | Fe | La |
| 1 | 2.01 | 20.2 | 67.7 | 10.2 | - | 1.27 |
| 2 | 1.05 | 17.9 | 65.7 | 11.9 | - | - |
| 3 | 1.19 | 16.0 | 55.8 | 12.9 | 14.0 | 0.51 |
| 4 | 4.29 | 9.53 | 23.5 | 2.27 | 52.2 | 3.42 |
| 5 | 1.01 | 16.5 | 66.4 | 9.66 | 4.47 | 1.41 |
| 6 | 1.16 | 18.3 | 68.7 | 10.5 | 1.37 | - |

РЭМ-исследования поверхности зерен мезолита и анальцима в режиме элементного контраста также свидетельствовали о наличии кристаллической фазы лантана (рис. 4). На поверхности мезолита установлено большее скопление кристаллов лантана по сравнению с остальными минералами (табл. 4). На поверхности анальцима лантан обнаружен во всех исследованных кристалликах (табл. 5).

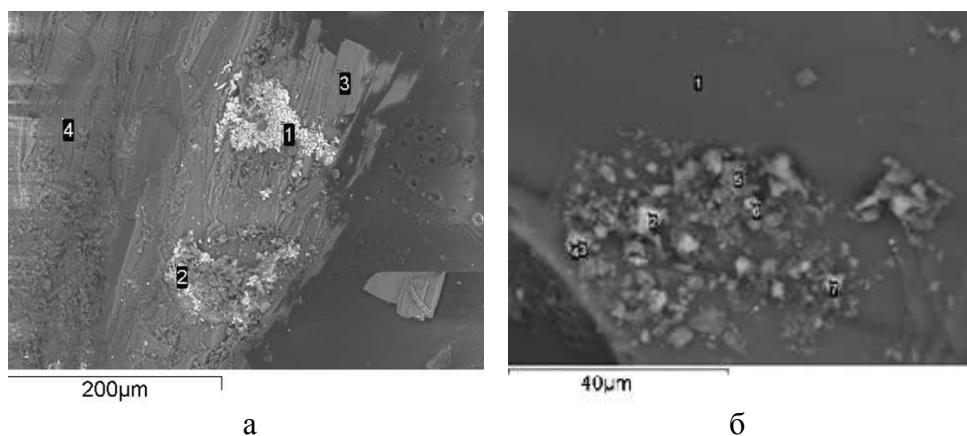


Рис. 4. Электронно-микроскопические снимки поверхности зерен La-формы мезолита (а) и анальцима (б).

Таким образом, методами растровой электронной микроскопии и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии показано концентрирование ионов лантана в виде скоплений, агрегатов довольно крупных размеров в большей степени на щелях и шероховатостях поверхности цеолитов по сравнению со срезом. Предположение о ситовом эффекте, проявляющемся мономинеральными формами цеолитов, по отношению к ионам лантана подтверждено образованием кристаллов на поверхности цеолитов. Аквакомплекс лантана связывается с алюмосиликатной поверхностью цеолита, возможно, за счет атомов кислорода с образованием водородных связей.

Таблица 4. Элементный состав среза зерна мезолита

| № | Концентрация, мас. % | | | | |
|---|----------------------|------|------|------|------|
| | Na | Al | Si | Ca | La |
| 1 | 1.78 | 5.38 | 8.36 | 1.59 | 82.9 |
| 2 | 2.54 | 7.19 | 10.6 | 24.6 | 55.0 |
| 3 | 7.35 | 32.5 | 50.2 | 9.88 | - |
| 4 | 9.82 | 29.7 | 53.4 | 7.07 | - |

Таблица 5. Элементный состав среза зерна аналцима

| № | Концентрация, мас. % | | | | | | | |
|---|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| | Na | Mg | Al | Si | K | Ca | Fe | La |
| 1 | 8.25 | - | 9.83 | 23.0 | - | - | - | - |
| 2 | 6.13 | 0.47 | 10.4 | 26.7 | 0.57 | 0.77 | 13.2 | 2.93 |
| 3 | 7.47 | 6.78 | 11.9 | 31.6 | 0.31 | 0.52 | 1.63 | 2.97 |
| 4 | 9.46 | 6.69 | 13.1 | 32.5 | - | 0.36 | 1.54 | 2.93 |
| 5 | 4.26 | 0.28 | 8.58 | 29.1 | 0.59 | 1.08 | 0.48 | 0.93 |
| 6 | 6.76 | 0.36 | 11.9 | 34.5 | 4.42 | 0.48 | 1.02 | 0.94 |
| 7 | 9.11 | 0.62 | 14.6 | 33.9 | 0.23 | 0.34 | 2.46 | 2.26 |

Аналогичное образование на поверхности цеолитов кристаллической фазы свинца, меди, серебра описано в работе Д. Брека [13]. Ее появление объяснено дестабилизацией ионов металлов в цеолитной структуре, в результате чего катионы металлов диффундируют к поверхности кристалла цеолита и агрегируют в небольшие кристаллиты. Образование различных агрегаций на поверхности зерен цеолитов может быть также объяснено правилом Фаянса-Пескова-Панета [18], согласно которому на поверхности твердого вещества преимущественно адсорбируются те ионы, которые способны достраивать кристаллическую решетку, изоморфны или образуют труднорастворимое соединения с ионами, входящими в кристаллическую решетку. Различают избирательную, имеющую необратимый характер, и обменную адсорбцию, носящую обратимый характер. Поскольку при анализе качественного состава кристалликов с помощью РЭМ обнаружены только атомы лантана, предположено, что ионы лантана концентрируются на поверхности цеолитов либо в виде оксида лантана, либо гидроксида, что маловероятно. Гидроксид лантана малорастворим в воде и щелочах (рН осаждения из раствора нитратов равен 7.8). Возможно также образование полимерных частиц, что характерно для большинства гидроксокомплексов металлов [19, 20]. Механизм реакций гидролиза ионов металлов в разбавленных растворах в основном характеризуется образованием мономерных гидроксокомплексов [21, 22].

Заключение

Электронно-микроскопическое исследование и энергодисперсионный анализ элементного состава природных цеолитов позволили установить преимущественно поверхностное, неравномерное распределение ионов лантана. На поверхности зерен мономинералов цеолитов ионы лантана обнаружены в составе кристаллической фазы, локализованной на различных структурных дефектах. Качественный состав агрегаций выявил только атомы лантана. Предположено, что ионы лантана концентрируются на поверхности цеолитов в виде аква- и гидроксокомплексов.

Работа выполнена в рамках темы НИР ПФНИ ГАН IX.137.1.4.

Взаимодействия в системе вода-порода-органическое вещество в природных и техногенных обстановках Байкальского региона (Лаборатория гидрогеологии и геоэкологии.

Руководитель проекта - д.г.-м.н. А.М. Плюснин), № гос. рег. АААА-А17-117021310076-3

Список литературы

1. Челищев Н.Ф., Маликов А.В. // *Известия АН СССР. Серия геология*. 1987. №7. С. 88-94.
2. Мотылева С.М., Леоничева Е.В., Роева Т.А. // *Аграрный вестник Урала*. 2012. № 2 (94). С. 24-26.
3. Хатькова А.Н. Дисс. докт. техн. наук. Чита. 2004. 43 с.
4. Дампилова Б.В., Зонхоева Э.Л. // *Вестник БГУ*. 2005. Серия 1. Вып. 2. С. 106-113.
5. Зонхоева Э.Л., Санжанова С.С. // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2015. Т. 15. № 3. С. 404-411.
6. Санжанова С.С., Зонхоева Э.Л. // *Журнал физической химии*. 2017. Т. 91. № 11. С. 1917-1923.
7. Мелихов И.В., Кулюхин С.А. // *Журнал физической химии*. 2010. Т. 84. № 8. С. 1417-1420.
8. Шутилов Р.А., Гаврилов В.Ю., Ларина Т.В. "Современная химическая физика", тезисы докладов 21-го симпозиума, 25 сентября – 6 октября 2009 г. Туапсе. 2009. С. 104.
9. Цеолитоносность базальтов Забайкалья. Под ред. Андреева Г.В. Новосибирск. Наука. 1989. 96 с.
10. Челищев Н.Ф., Володин В.Ф., Крюков В.Л. Ионообменные свойства природных высококремнистых цеолитов. М. Наука. 1988. 128 с.
11. Лапутина И.П. Микрозонд в минералогии. М. Наука. 1991. 139 с.
12. Нерадовский Ю.Н. Рудная минераграфия. Мурманск. Изд-во МГТУ. 2009. 76 с.
13. Брек Д. Цеолитовые молекулярные сита. М. Мир. 1976. 781 с.
14. Серебренников В.В. Химия редкоземельных элементов. (Скандий, иттрий, лантаноиды). Томск. Изд-во Томского ун-та. 1961. 801 с.
15. Оура К., Лившиц В.Г., Саранин А.А., Зотов А.В., Катаяма М. Введение в физику поверхности. М. Наука. 2006. 490 с.
16. Пул Ч., Оуэнс Ф. Нанотехнологии. Мир материалов и технологий. М. Техносфера. 2005. 336 с.
17. Семушин В.Н. Рентгенографический определитель цеолитов. Новосибирск. Наука. 1986. 128 с.
18. Жолнин А.В. Общая химия. М. ГЭО-ТАР-Медиа. 2012. 212 с.
19. Лурье Ю.Ю. Справочник по аналитической химии. М. Химия. 1971. 456 с.
20. Кощей Е.В. Дисс. канд. хим. наук. Оренбург. 2002. 21 с.
21. Назаренко В.А., Антонович В.П., Невская Е.М. Гидролиз ионов металлов в разбавленных растворах. М. Атомиздат. 1979. 192 с.
22. Чиркст Д.Э., Лобачева О.Л., Джевага Н.В. // *Журнал физической химии*. 2011. Т. 85. № 11. С. 2011-2014.

References

1. Chelishchev N.F., Malikov A.V., *Izvestiya AN SSSR. Seriya geologiya*, 1987, No 7, pp. 88-94.
2. Motyleva S.M., Leonicheva E.V., Roeva T.A., *Agrarnyj vestnik Urala*, 2012, No 2 (94), pp. 24-26.

3. Hat'kova A.N. Diss. dokt. tekhn. nauk. CHita, 2004, 43 ps.
4. Dampilova B.V., Zonhoeva E.H.L., *Vestnik BGU*, 2005, Seriya 1, Vyp. 2, pp. 106-113.
5. Zonhoeva E.H.L., Sanzhanova S.S., Sorbionnye i khromatograficheskie protsessy, 2015, Vol. 15, No 3, pp. 404-411.
6. Sanzhanova S.S., Zonhoeva E.H.L., *ZHurnal fizicheskoy khimii*, 2017, Vol. 91, No 11, pp. 1917-1923.
7. Melihov I.V., Kulyuhin S.A., *ZHurnal fizicheskoy khimii*, 2010, Vol. 84, No 8, pp. 1417-1420.
8. SHutilov R.A., Gavrilov V.YU., Larina T.V., *Sovremennaya himicheskaya fizika*, teziy dokladov 21-go simpoziuma, 25 sentyabrya – 6 oktyabrya 2009 g., Tuapse, 2009, pp. 104.
9. Ceolitonosnost' bazal'tov Zabajkal'ya. Pod red. Andreeva G.V. Novosibirsk, Nauka, 1989, 96 sp
10. CHelishchev N.F., Volodin V.F., Kryukov V.L. Ionoobmennyye svoystva prirodnykh vysokokremnistykh ceolitov. M., Nauka, 1988, 128 p.
11. Laputina I.P. Mikrozonnd v mineralogii. M., Nauka, 1991, 139 p.
12. Neradovskij YU.N. Rudnaya mineragrafiya. Murmansk, Izd-vo MGTU, 2009, 76 p.
13. Brek D. Ceolitovye molekulyarnye sita. M., Mir, 1976, 781 p.
14. Serebrennikov V.V. Himiya redkozemel'nyh ehlementov. (Skandij, ittrij, lantanoidy). Tomsk, Izd-vo Tomskogo un-ta, 1961, 801 p.
15. Oura K., Livshic V.G., Saranin A.A., Zotov A.V., Katayama M. Vvedenie v fiziku po-verhnosti. M., Nauka, 2006, 490 p.
16. Pul CH., Ouehns F. Nanotekhnologii. Mir materialov i tekhnologij. M., Tekhnosfera, 2005, 336 p.
17. Semushin V.N. Rengenograficheskij opredelitel' ceolitov. Novosibirsk, Nauka, 1986, 128 p.
18. ZHolnin A.V. Obshchaya himiya. M., GEHOTAR-Media, 2012, 212 p.
19. Lur'e YU.YU. Spravochnik po analiticheskoy himii. M., Himiya, 1971, 456 s.
20. Koshchej E.V. Diss. kand. him. nauk. Orenburg, 2002, 21 p.
21. Nazarenko V.A., Antonovich V.P., Nevskaya E.M. Gidroliz ionov metallov v razbavlennykh rastvorah. M., Atomizdat, 1979, 192 p.
22. CHirkst D.EH., Lobacheva O.L., Dzhevaga N.V., *ZHurnal fizicheskoy khimii*, 2011, Vol. 85, No 11, pp. 2011-2014.

Дампилова Баярма Викторовна – к.х.н., н. с., лаборатория гидрогеологии и геоэкологии ФГБУН Геологического института СО РАН, Улан-Удэ

Зонхоева Эльвира Лопсондоржиевна - к.х.н., в.н.с., лаборатория гидрогеологии и геоэкологии ФГБУН Геологического института СО РАН, Улан-Удэ

Dampilova Bayarma V. – Ph.D (Chem), researcher, Geological Institute Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, bdampilova@geo.stbur.ru

Zonkhoeva Elvira L. – Ph.D (Chem), leading researcher, Geological Institute Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, zonkhoevae@geo.stbur.ru