Геоэкология

DOI: 10.35634/UdSU.2026.94.80.011

УДК 544.723+661.183.6

С.Б. Ярусова, П.С. Гордиенко, А.Е. Панасенко, У.В. Харченко, И.А. Беленева, П.В. Гриценко, С.Н. Данилова

ОТХОДЫ БОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА КАК СЫРЬЕ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СОРБЕНТОВ[1]

Аннотация. Статья посвящена исследованию возможности получения сорбционных материалов на основе силикатов кальция из отходов производства борной кислоты (борогипса). В зависимости от условий синтеза силикатно-кальциевых сорбентов (различная температура и продолжительность) получены данные по их фазовому составу, плотности и удельной поверхности. Установлено, что основным механизмом сорбции ионов тяжелых металлов является катионный обмен, что подтверждено методами рентгенофазового анализа, атомно-абсорбционной спектрометрии и элементного анализа. Показано, что сорбция метиленового синего протекает по монослойному механизму и удовлетворительно описывается моделью Ленгмюра, а кинетика процесса – моделью псевдо-второго порядка. Исследована эффективность адсорбции патогенных и условно-патогенных микроорганизмов (*Escherichia coli*, *Bacillus subtilis*) синтетическими силикатами кальция: наибольшая сорбционная способность (>90 %) достигнута по отношению к *Escherichia coli*, при этом образцы из борогипса превосходят известный энтеросорбент «Белый уголь». Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования отходов борного производства для создания сорбентов для очистки водных сред от тяжелых металлов, красителей и микроорганизмов.

Ключевые слова: борогипс, силикаты кальция, сорбция, механизм, кинетика, тяжелые металлы, метиленовый синий, микроорганизмы.

Для цитирования: Отходы борного производства как сырье для получения сорбентов / С.Б. Ярусова, П.С. Гордиенко, А.Е. Панасенко, У.В. Харченко, И.А. Беленева, П.В. Гриценко, С.Н. Данилова// Управление техносферой: электрон. журнал, 2026. Т. 9. Вып. 3. С. 741–761. DOI: 10.35634/UdSU.2026.94.80.011

[1]*Работа выполнена в рамках гос. задания Института химии ДВО РАН № FWFN (0205)-2025-0002*

Введение

Спектр силикатов кальция и производных материалов, используемых в качестве сорбентов, весьма разнообразен. Их применяют и активно исследуют для извлечения из объектов окружающей среды широкого круга поллютантов: тяжелых металлов, долгоживущих радионуклидов, пестицидов, красителей, фенолов, неорганических анионов, а также патогенных и условно-патогенных микроорганизмов. Среди исследуемых соединений данного класса – гидрометасиликат кальция CSH (I), α-C_2SH, C_3S, ксонотлит $Ca_6[Si_6O_{17}](OH)_2$, 11 Å тоберморит $Ca_{10}[Si_{12}O_{31}](OH)_6 \cdot 8H_2O$, волластонит $Ca_6Si_6O_{18}$, риверсайдит $Ca_5[Si_6O_{16}](OH)_2 \cdot 2H_2O$ и др. [1–9]. В последнее время активно исследуют сорбционные материалы на основе силикатов кальция, в качестве примеров можно привести композитный сорбент на основе кальцита, гидросиликата кальция C_3S и силикагеля; магнитный наноструктурированный гидросиликат кальция; композитные адсорбенты на основе гидроксиапатита/гидрата силиката кальция (HAP/C-S-H) и фторапатита/гидрата силиката кальция (FAP/C-S-H); наноструктурированный гидрат силиката кальция, модифицированный Fe(III) и намагниченный коммерческими или синтетическими наночастицами магнетита; немодифицированный и модифицированный полиэтиленимином гидросиликат кальция CSH (I); силикат кальция, функционализированный тиолом; наносиликат кальция, модифицированный оксидом меди; композит, состоящий из кристаллических цеолитов (стилбит и тетранатролит) и аморфного гидрата силиката кальция C-S-H (II) и др. [10–17].

В данной статье представлены основные результаты по использованию материалов на основе силикатов кальция, полученных из отходов производства борной кислоты (борогипса) в различных условиях в качестве сорбентов. Приведены результаты исследований сорбционных свойств силикатов кальция по отношению к ионам тяжелых металлов, метиленовому синему, патогенным и условно-патогенным микроорганизмам *Escherichia coli* и *Bacillus subtilis*.

Отходы производства борной кислоты (с содержанием основных компонентов, масс.%: SiO_2 – 26-28; CaO – 26-28; SO_4^{2-} – 38-40; Fe_2O_3 – 1,8-2,0; Al_2O_3 – 0,6-0,8; B_2O_3 – 0,7-1,2; MnO – 0,2; MgO – 0,1-0,2) смешивали с раствором гидроксида калия квалификации «ч.д.а» в стехиометрическом соотношении.

Данные по фазовому составу исследуемых образцов, их плотности и удельной поверхности приведены в табл. 1 [2, 18].

Таблица 1

Условия синтеза и характеристика силикатных сорбентов из борогипса

Сорбент	**Температура и время обработки отходов**	**Фазовый состав продукта**	**Удельная поверхность, $м^2/г$; плотность, $г/см^3$**
БГ СК 20	20–25 °С, ультразвуковая обработка, 6 ч	Аморфная фаза, $CaCO_3$ (кальцит), SiO_2 (кварц)	50 $м^2/г$
БГ СК 118		Аморфная фаза, кальцит $CaCO_3$, кварц SiO_2	22,0–40,0 $м^2/г$; 2,25 $г/см^3$
БГ СК 120-24	120 °С, автоклавная обработка, 24 ч	кальцит $CaCO_3$, кварц SiO_2, тоберморит 9Å $Ca_5Si_6O_{16}(OH)_2$	2,22 $г/см^3$
БГ СК 200-24	200 °С, автоклавная обработка, 24 ч	ксонотлит $Ca_6Si_6O_{17}(OH)_2$, тоберморит 9Å $Ca_4Si_6O_{15}(OH)_2 \cdot 5H_2O$, скоутит $Ca_7Si_6O_{18}CO_3 \cdot 2H_2O$	2,59 $г/см^3$
БК СК 220-3	220 °С, автоклавная обработка, 3 ч	Аморфная фаза, тоберморит 9Å $Ca_4(Si_6O_{15})(OH)_2 \cdot 5H_2O$	102,4 $м^2/г$; 2,65 $г/см^3$
БГ СК 220-6	220 °С, автоклавная обработка, 6 ч	аморфная фаза, тоберморит 9Å $Ca_4(Si_6O_{15})(OH)_2 \cdot 5H_2O$; ксонотлит $Ca_6Si_6O_{17}(OH)_2$;	155,2 $м^2/г$; 3,1 $г/см^3$

Как видно из представленной таблицы, формирование кристаллических силикатов кальция (тоберморита) зафиксировано в условиях автоклавной обработки борогипса при температуре 120 °С. При 200 °С наблюдается образование ксонотлита $Ca_6Si_6O_{17}(OH)_2$ и скоутита $Ca_7Si_6O_{18}CO_3 \cdot 2H_2O$. Известно, что ксонотлит $Ca_6Si_6O_{17}(OH)_2$ образуется при более высоких

температурах, чем тоберморит, причем равновесная фазовая граница между этими двумя минералами проходит при температуре около 140 °C [19, 20]. Для скоутита $Ca_7Si_6O_{18}CO_3 \cdot 2H_2O$ образование связано с присутствием CO_2 и H_2O в избытке. Скоутит может быть синтезирован при температурах от 175 до 300 °C, но обычно дает смесь скоутита с тоберморитом, кальцитом и/или ксонотлитом [21]. При 220 °C образование скоутита не фиксируется, что может быть связано с недостаточной продолжительностью автоклавной обработки.

Получены данные по сорбции ряда ионов тяжелых металлов Co^{2+} Cd^{2+} Pb^{2+} Zn^{2+} Ni^{2+} Cu^{2+} Sr^{2+} исследуемыми сорбентами. Сорбционная емкость силикатов кальция в зависимости от типа сорбента, условий его получения, условий сорбции варьирует от 0,1 до 4,04 ммоль·г$^{-1}$. Наибольшие значения сорбционной емкости получены для ионов Co^{2+} (~ 4,1 ммоль/г) [22], что легло в основу разработки составов на основе $CaCoSi_2O_6$ для получения методом искрового плазменного спекания твердотельных керамических матриц для иммобилизации кобальта, свойства которых соответствуют требованиям ГОСТ Р 50926-96 для отвержденных высокоактивных отходов [23].

Основным механизмом сорбции является катионный обмен ионов Ca^{2+} на ионы соответствующего металла Me^{2+}. Формируемые в данных условиях силикатно-кальциевые сорбенты представляют собой многокомпонентные системы, что обусловливает необходимость учета возможного взаимодействия солей металлов с гидросиликатом кальция, $CaCO_3$, SiO_2 и $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ при исследовании механизма сорбции ионов тяжёлых металлов и радионуклидов. Выполнен расчет значений свободной энергии Гиббса ($\Delta G°_{х.р}$) для соответствующих химических реакций. Данные рентгенофазового анализа (РФА) осадков после сорбции подтверждают предварительные расчёты $\Delta G°_{х.р}$, характеризующие наиболее вероятные реакции образования соединений в рассматриваемых процессах. На дифрактограммах осадков после сорбции идентифицированы следующие кристаллические фазы: в опытах с Cd^{2+}

– $CdCO_3$; с Pb^{2+} – $PbSO_4$ и $PbCO_3$; со Sr^{2+} – $SrSO_4$ и $SrSiO_3$; с Cu^{2+} – $CuCO_3$ и $CaCuO_2$. Поскольку гидросиликаты свинца, меди, цинка, никеля и кадмия рентгеноаморфны, их идентификация в составе осадков методом РФА невозможна. Полученные данные подтверждены атомно-абсорбционным анализом динамики концентрации ионов Ca^{2+} в фильтратах после сорбции, а также элементным анализом твердых осадков [2, 18, 24]. Получены данные по кинетике сорбции ионов тяжелых металлов силикатами кальция из борогипса [18, 25].

Сорбционные свойства синтетических силикатов кальция (образцы БК СК 220-3, БГ СК 220-6, БГ СК 120-24, БГ СК 200-24) были изучены и на модельном красителе – метиленовом синем. В научной литературе описан широкий спектр материалов на основе силикатов кальция, изученных в отношении сорбции МС в различных условиях: тоберморит; сорбент на основе кварца, кристобалита, кальцита и тоберморита; композит на основе активированного угля и гидроксиапатита с добавлением $CaSiO_3$; аморфные CSH из рисовой соломы; композитные адсорбенты на основе гидроксиапатита/гидрата силиката кальция (HAP/C-S-H) и фторапатита/гидрата силиката кальция (FAP/ C-S-H) и др. [2, 17, 26–28]. Сорбционная емкость силикатно-кальциевых материалов по отношению к МС составляет 6–147 мг/г в зависимости от состава исходного сырья, условий синтеза и особенностей модифицирования материала.

Было установлено, что сорбция метиленового синего (МС) на исследуемых образцах из борогипса происходит по монослойному механизму, что подтверждается видом изотермы, в целом соответствующей модели Ленгмюра. Значения сорбционной емкости по МС для вышеуказанных образцов варьируют от 18,2 до 24,4 мг/г.

На рис. 1 приведены кинетические кривые сорбции МС сорбентами БГ СК 120-24 (кривая 4), БГ СК 200-24 (кривая 5). Для сравнения приведены

кинетические кривые сорбции МС силикатно-кальциевыми сорбентами, полученными в условиях автоклавной обработки из различных сырьевых компонентов: морских раковин, диатомита и NaOH (кривая 1), реактивов $CaCl_2$, SiO_2, NaOH с последующим обжигом при 1000°C (кривая 2), золы рисовой шелухи, $CaCl_2$ и NaOH (кривая 3). Для образцов БК СК 220-3, БГ СК 220-6 кинетические кривые сорбции МС описаны в [18]. Как видно из представленных зависимостей, время достижения равновесия для всех образцов составляет примерно 10–15 мин. Кинетические кривые сорбции МС материалами БК СК 220-3, БГ СК 220-6, БГ СК 120-24, БГ СК 200-24 проанализированы в соответствии с моделями псевдо-первого и псевдо-второго порядка:

$$\log(A_e - A_t) = \log A_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad (1)$$

$$\frac{t}{A_t} = \frac{1}{k_2 A_e^{\,2}} + \frac{1}{A_e} t \ , \quad (2)$$

где k_1 – константа скорости сорбции модели псевдо-первого порядка, k_2 – константа скорости сорбции модели псевдо-второго порядка; A_e, A_t – сорбционная емкость в состоянии равновесия и в момент времени t соответственно.

Кажущиеся псевдо-скоростные константы, k_1 и k_2, соответствующие квадраты коэффициентов корреляции R^2, показывающие правильность соотнесения с кинетическими моделями псевдо-первого и псевдо-второго порядков, приведены в табл. 2.

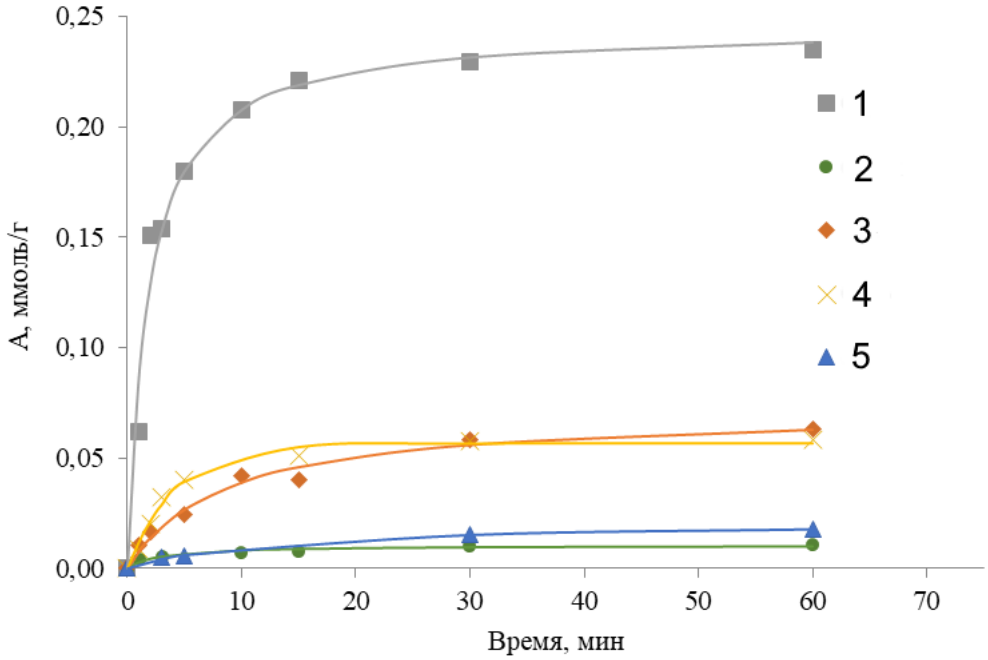


Рис.1. Кинетические кривые сорбции метиленового синего силикатами кальция из различных исходных компонентов

Таблица 2

Результаты обработки кинетических кривых адсорбции МС диатомитом моделями химической кинетики

Температура, °С	Кинетическая модель			
	Псевдо-первого порядка		Псевдо-второго порядка	
	k_1, мин$^{-1}$	R^2	k_2, г·ммоль$^{-1}$· мин$^{-1}$	R^2
БК СК 220	0,15	0,8295	0,008	0,9902
БГ СК 220-6 ч	0,073	0,6468	0,01	0,9876
БГ СК 120-24	0,10	0,9900	4,37	0,9860
БГ СК 200-24	0,035	0,9900	3,72	0,9960

Из данных, представленных в табл.2, следует, что процесс сорбции для сорбентов из борогипса наилучшим образом описывается моделью псевдо-второго порядка, о чем свидетельствуют соответствующие коэффициенты корреляции.

В настоящее время активно исследуется взаимодействие природных, синтетических и модифицированных силикатов и алюмосиликатов

с различными микроорганизмами, включая патогенные и условно-патогенные, что расширяет области их применения – например, в качестве энтеросорбентов с сорбционно-детоксикационными свойствами и для очистки воды [29–36].

В табл.3 приведены данные по эффективности адсорбции бактерий *Escherichia coli* и *Bacillus subtilis* силикатами кальция БК СК 220-3 и БГ СК 220-6 в сравнении с силикатом кальция, полученным в гидротермальных условиях при 220 °С в модельной многокомпонентной системе $CaSO_4 \cdot 2H_2O–SiO_2 \cdot nH_2O–KOH–H_2O$, аналогичной по составу системе «борогипс – щелочь (KOH)» (далее – модельный образец). Удельная поверхность модельного образца 146,4 $м^2/г$, фазовый состав: аморфная фаза и фазы волластонита $CaSiO_3$ моноклинной модификации, гидросиликата кальция $Ca_{1.5}SiO_{3.5} \cdot xH_2O/1.5CaO \cdot SiO_2 \cdot xH_2O$ и тоберморита 9 Å $Ca_4(Si_6O_{15})(OH)_2 \cdot 5H_2O$ [36].

Данные по адсорбции бактерий силикатами кальция БК СК 220-3 и БГ СК 220-6 в течение 2 ч приведены в табл. 3.

Таблица 3

Сорбция микроорганизмов синтетическими силикатами кальция

Культура микроорганизмов	**Эффективность сорбции, %**		
	МО	БК СК 220-3	БГ СК 220-6
Escherichia coli	89,3	94,3	96,4
Bacillus subtilis	66,7	62,5	76,5

Как видно из представленных данных, наибольшая сорбционная емкость наблюдается по отношению к бактериям *Escherichia coli* для исследуемых образцов. Наибольшую сорбционную емкость по отношению к *Escherichia coli* (>90 %) проявляют образцы из борогипса. Эффективность сорбции *Bacillus subtilis* для всех образцов ниже по сравнению с *Escherichia coli*. Наибольшей сорбционной емкостью характеризуется образец БГ СК 220-6. В качестве образца сравнения использовали известный и широко используемый препарат-энтеросорбент на основе диоксида кремния с ярко выраженными

сорбционными свойствами, который выпускается под торговым названием «Белый уголь». Установлено, что после 24 ч контакта данного препарата с культурами микроорганизмов его эффективность ниже по сравнению с образцами из борогипса. Эффективность сорбции *Escherichia coli* и *Bacillus subtilis* препаратом «Белый уголь» составляет 85,8 % и 45,8%, соответственно [2].

Заключение

Проведенные исследования показали, что отходы производства борной кислоты (борогипс) являются перспективным сырьем для получения силикатно-кальциевых сорбентов. В зависимости от условий синтеза (температура, продолжительность, вид обработки) формируются материалы с различным фазовым составом – от аморфных до кристаллических силикатов кальция (тоберморит, ксонотлит, скоутит).

Установлено, что сорбция ионов тяжелых металлов (Co^{2+}, Cd^{2+}, Pb^{2+}, Zn^{2+}, Ni^{2+}, Cu^{2+}, Sr^{2+}) протекает преимущественно по механизму катионного обмена Ca^{2+} на ионы металла; сорбционная емкость варьирует от 0,1 до 4,04 ммоль·$г^{-1}$. Расчёты свободной энергии Гиббса и данные РФА подтверждают образование кристаллических фаз ($CdCO_3$, $PbSO_4$, $PbCO_3$, $SrSO_4$, $SrSiO_3$, $CuCO_3$, $CaCuO_2$), а результаты атомно-абсорбционного и элементного анализа – замещение кальция в составе сорбентов на катион соответствующего металла.

Показано, что сорбция метиленового синего исследуемыми материалами происходит по монослойному механизму (модель Ленгмюра) с сорбционной емкостью 18,2–24,4 мг/г; кинетика процесса наилучшим образом описывается моделью псевдо-второго порядка, время достижения равновесия составляет 10–15 мин.

Выявлена высокая эффективность синтетических силикатов кальция из борогипса в отношении патогенных и условно-патогенных микроорганизмов: сорбция *Escherichia coli* превышает 90 %, *Bacillus subtilis* –

62–76 %, что превосходит показатели известного энтеросорбента «Белый уголь» (85,8 % и 45,8 % соответственно).

Таким образом, силикатно-кальциевые сорбенты, полученные из отходов борного производства, могут рассматриваться как эффективные и экономически целесообразные материалы для очистки водных сред от тяжелых металлов, радионуклидов, красителей и микроорганизмов. Вместе с тем детальное изучение механизмов сорбции в каждом конкретном случае требует проведения дополнительных исследований.

Исследования по данной проблеме входят в план Научного совета РАН по физической химии (секция «Адсорбционные явления»).

Работа выполнена в рамках гос. задания Института химии ДВО РАН № FWFN (0205)-2025-0002 (тема 2, раздел 3, 5).

Исследования выполнены с использованием оборудования ЦКП Дальневосточный центр структурных исследований ИХ ДВО РАН и ЦКП Приморский центр локального, элементного и изотопного анализа ДВГИ ДВО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гладун В.Д. Синтетические силикаты кальция / В.Д.Гладун, Л.В.Акатьева, А.И.Холькин. М.: ИРИСБУК, 2011. 232 с.
2. Экологические исследования на Дальнем Востоке России: история и современность: монография / под ред. В.Ю. Цыганкова, С.Б. Ярусовой. Владивосток: Изд-во ВВГУ, 2023. 370 с. DOI: 10.24866/0685-5-2022-380.
3. Papynov E.K., Trukhin I.S., Mayorov V.Yu. et al. Sorption of Phosphates on Macroporous Synthetic Calcium Silicates, Doklady Physical Chemistry, 2017, vol. 473, Part 2, pp. 61–65. DOI: 10.1134/S0012501617040030.
4. Ma J., Qin G., Zhang Y. et al. Heavy metal removal from aqueous solutions by calcium silicate powder from waste coal fly-ash, Journal of Cleaner Production, 2018, vol. 182, pp. 776–782. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.02.115.

5. Shao N., Li S., Yan F. et al. An all-in-one strategy for the adsorption of heavy metal ions and photodegradation of organic pollutants using steel slag-derived calcium silicate hydrate, Journal of Hazardous Materials, 2020, vol. 382, p. 121120, DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.121120.
6. Qi F., Zhu G., Zhang Y. et al. Eco-utilization of silicon-rich lye: Synthesis of amorphous calcium silicate hydrate and its application for recovering heavy metals, Separation and Purification Technology, 2022, vol. 282, p. 120092, DOI: 10.1016/j.seppur.2021.120092.
7. Liu X., Feng P., Chen J. et al. A critical review on the interaction between calcium silicate hydrate (C-S-H) and different ions, Construction and Building Materials, 2024, vol. 413, 134931, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.134931.
8. Svedaite E., Baltakys K., Levisauskas D. et al. Effect of temperature and P^{5+} ions concentration on the phosphorus adsorption mechanism by synthetic calcium silicate hydrates, Journal of Hazardous Materials Advances, 2026, vol. 22, p. 101159. DOI: 10.1016/j.hazadv.2026.101159.
9. Hashem A.A., Mahmoud S.A., Geioushy R.A. et al. Adsorption of malachite green dye over synthesized calcium silicate nanopowders from waste materials, Materials Science and Engineering: B, 2023, vol. 295, 116605. DOI: 10.1016/j.mseb.2023.116605.
10. Chen Q., Hills C.D., Yuan M. et al. Characterization of carbonated tricalcium silicate and its sorption capacity for heavy metals: A micron-scale composite adsorbent of active silicate gel and calcite, Journal of Hazardous Materials, 2008, vol. 153, no. 1–2, pp. 775–783. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.09.023.
11. Zhang Z., Wang X., Wang H. et al. Removal of Pb(II) from aqueous solution using hydroxyapatite/calcium silicate hydrate (HAP/C-S-H) composite adsorbent prepared by a phosphate recovery process, Chemical Engineering Journal, 2018, vol. 344, pp. 53–61. DOI: 10.1016/j.cej.2018.03.066.
12. Briso A., Quintana G., Ide V. et al. Integrated use of magnetic nanostructured calcium silicate hydrate and magnetic manganese dioxide adsorbents for remediation of an acidic mine water // Journal of Water Process Engineering, 2018. vol. 25, pp. 247–257. DOI: 10.1016/j.jwpe.2018.08.010.
13. Valenzuela F., Quintana G., Briso A. et al. Cu(II), Cd(II), Pb(II) and As(V) adsorption from aqueous solutions using magnetic iron-modified calcium silicate hydrate: Adsorption kinetic analysis, Journal of Water Process Engineering, 2021, vol. 40, p. 101951. DOI: 10.1016/j.jwpe.2021.101951.

14. You W., Hong M., Zhang H. et al. Functionalized calcium silicate nanofibers with hierarchical structure derived from oyster shells and their application in heavy metal ions removal, Phys. Chem. Chem. Phys, 2016, vol. 18, pp. 15564–15573. DOI: 10.1039/c6cp01199c.
15. Lihua L., Li T., Yang G. et al. Synthesis of thiol-functionalized mesoporous calcium silicate and its adsorption characteristics for heavy metal ions, Journal of Environmental Chemical Engineering, 2017, vol. 5, pp. 6201–6215. DOI: 10.1016/j.jece.2017.11.046.
16. El-khalafawy A., Hashem F.S., Hassan H.S. Tracking the Adsorptive properties of modified nano calcium silicate/CuO composite for Cs(I) and Co(II) uptake from waste stream, Microporous and Mesoporous Materials, 2024, vol. 371, 113074. DOI: 10.1016/j.micromeso.2024. 113074.
17. Agourrame H., El Amri A., Ez-zaki H. et al. Synthesis and characterization of a new inorganic material of fluor/hydroxyapatite- C-S-H mixtures from blast furnace slag and their application in the removal of a cationic dye (methyleneblue) in aqueous solution, Inorganic Chemistry Communications, 2025, vol. 175, 114163. DOI: 10.1016/j.inoche.2025.114163.
18. Комплексная переработка борсодержащего минерального сырья и техногенных отходов: монография / коллектив авторов; под научной редакцией доктора технических наук, профессора П.С. Гордиенко; ответственный редактор С.Б. Ярусова, И.Ю. Буравлев. Владивосток: Издательство ВВГУ, 2024. 198 с. DOI: 10.24866/9736-0725-8.
19. Shaw S., Clark S.M., Henderson C.M.B. Hydrothermal formation of the calcium silicate hydrates, tobermorite ($Ca_5Si_6O_{16}(OH)_2 \cdot 4H_2O$) and xonotlite ($Ca_6Si_6O_{17}(OH)_2$): an in situ synchrotron study, Chemical Geology, 2000, vol. 167, issue 1–2, pp. 129–140. DOI: 10.1016/S0009-2541(99)00205-3.
20. Андрющенко Э.Н., Достовалов Д.В., Замараева А.В.и др. Получение тоберморита из отходов борного производства // Материалы 3(74-й) региональной итоговой научно-практической конференции преподавателей и студентов БГПУ (г. Благовещенск, 24 апреля 2025 г.). В 2-х частях. Часть 1. Благовещенск: Благовещенский государственный педагогический университет, 2025. С. 254–256.
21. Zhang Y.-Q., Radha A.V., Navrotsky A. Thermochemistry of two calcium silicate carbonate minerals: scawtite, $Ca_7(Si_6O_{18})(CO_3) \cdot 2H_2O$, and spurrite, $Ca_5(SiO_4)_2(CO_3)$, Geochimica et Cosmochimica Acta, 2013, vol. 115, pp. 92–99. DOI: 10.1016/j.gca.2013.03.031.
22. Yarusova S.B., Gordienko P.S., Buravlev I.Yu. et al. The use of ultrasonic treatment in technological processes of complex processing of industrial waste: Energetic insights, Energy Aspects of Acoustic Cavitation and Sonochemistry. Editor(s): Oualid Hamdaoui, Kaouther

Kerboua. Elsevier, 2022, chapter 18, pp. 299–313. DOI: 10.1016/B978-0-323-91937-1.00008 6.

23. Shichalin O.O., Yarusova S.B., Ivanov N.P. et al. Calcium silicate solid-state matrices from boric acid production waste for 60Co removal and immobilization by spark plasma sintering, Journal of Water Process Engineering, 2024, vol. 59, 105042. DOI: 10.1016/j.jwpe.2024.105042.
24. Ярусова С.Б., Гордиенко П.С., Азарова Ю.А. Исследование сорбции тяжелых металлов сорбентами на основе силикатов кальция, полученными из техногенных отходов переработки борсодержащего минерального сырья // Интеллектуальный потенциал ВУЗов – на развитие Дальневосточного региона России и стран АТР: сб. матер. XVI Международной научно-практической конференции-конкурса научных докладов студентов, аспирантов и молодых исследователей «», г. Владивосток, 17–18 апреля 2014 г. Владивосток: Изд-во ВГУЭС, 2014. С. 147–156.
25. Ярусова С.Б., Гордиенко П.С., Юдаков А.А. Кинетика сорбции ионов тяжелых металлов сорбентом, полученным из отходов производства борной кислоты // Химическая технология. 2015. Т.16. № 10. С. 620–624.
26. Li M., Ren Z., Gao H. et al. Preparation of tobermorite onto flux-calcinated diatomite surface and the adsorption properties and mechanism of methylene blue, Desalination and Water Treatment, 2020, vol.188, pp. 247–256. DOI: 10.5004/dwt.2020.25430.
27. Zhang Y., Jing Z., Li Y. et al. Hydrothermal synthesis of tobermorite from diatomite and its adsorption performance for methylene blue, Materials Research Innovations, 2015, vol.19: S2-63-S2-69. DOI: 10.1179/1432891715Z. 0000000001312.
28. Moreno-Santos A., Rios-Hurtado J.C., Flores-Villaseñor S.E. et al. Hydroxyapatite Growth on Activated Carbon Surface for Methylene Blue Adsorption: Effect of Oxidation Time and $CaSiO_3$ Addition on Hydrothermal Incubation, Applied Sciences, 2023, vol. 13, 77. DOI: 10.3390/app13010077.
29. Везенцев А.И., Трубицын М.А., Кормош Е.В. Монтмориллонитовые глины как потенциальный сорбент патогенных веществ и микроорганизмов // Сорбционные и хроматографические процессы, 2012. Т. 12. Вып. 6. С.998.
30. Kubota M., Nakabayashi T., Matsumoto Y. et al. Selective adsorption of bacterial cells onto zeolites, Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2008, vol.64 (1), p. 88. DOI:10.1016/j.colsurfb.2008.01.012.

31. Li G.L., Zhou C.H., Fiore S. et al. Interactions between microorganisms and clay minerals: New insights and broader applications, Appl. Clay Sci, 2019, vol.177, p. 91. DOI: 10.1016/j.clay.2019.04.025.
32. Zhao W., Liu X., Huang Q. et al. Interactions of pathogens Escherichia coli and Streptococcus suis with clay minerals, Applied Clay Science, 2012, vol. 69, p. 37. DOI: 10.1016/j.clay.2012.07.003
33. Харченко У.В., Арефьева О.Д., Панасенко А.Е.и др. Сорбционные свойства кремнийсодержащих образцов по отношению к бактериям // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология, 2020. Т. 10. № 4. С. 603–612. DOI: 10.21285/2227-2925-2020-10-4-603-612.
34. Zemnukhova L.A., Kharchenko U.V., Beleneva I.A. Biomass derived silica containing products for removal of microorganisms from water, International Journal of Environmental Science and Technology, 2015, vol. 12, pp. 1495–1502. DOI 10.1007/s13762-014-0529-8.
35. Николаев В.Г., Михаловский С.В., Гурина Н.М. Современные энтеросорбенты и механизмы их действия // Эфферентная терапия, 2005. Т.11. № 4. С. 3–17.
36. Ярусова С.Б., Сомова С.Н., Харченко У.В. и др. Влияние условий синтеза силикатов кальция на кинетику процесса микробиологической очистки водных сред // Журнал неорганической химии, 2021. Т. 66. № 8. С. 1025–1031. DOI: 10.31857/S0044457X21080316.

Поступила в редакцию: 11.09.2026

Сведения об авторах

Ярусова Софья Борисовна
к.х.н., доцент, старший научный сотрудник; зав. базовой каф. ЭЭПХТ ВВГУ. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук», 690022, г.Владивосток, проспект 100-летия Владивостока, 159, Россия; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Владивостокский государственный университет», 690014, г.Владивосток, ул. Гоголя, 41, Россия.
E-mail: yarusova_10@mail.ru

Гордиенко Павел Сергеевич
д.т.н., профессор, зав. лаб. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук», 690022, г.Владивосток, проспект 100-летия Владивостока, 159, Россия.
E-mail: pavel.gordienko@mail.ru

Панасенко Александр Евгеньевич
к.х.н., старший научный сотрудник, заведующий лабораторией химии редких металлов Института химии ДВО РАН. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук», 690022, г.Владивосток, проспект 100-летия Владивостока, 159, Россия
E-mail: panasenko@ich.dvo.ru

Харченко Ульяна Валерьевна
к.х.н., научный сотрудник лаборатории электрохимических процессов. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук», 690022, г.Владивосток, проспект 100-летия Владивостока, 159, Россия.
E-mail: ulyanakchar@mail.ru

Беленева Ирина Алексеевна
к.б.н., старший научный сотрудник лаборатории морской микробиоты. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Национальный научный центр морской биологии им. А.В. Жирмунского ДВО РАН», 690041, г.Владивосток, ул. Пальчевского, д.17, Россия.
E-mail: beleneva.vl@mail.ru

Гриценко Полина Владимировна
инженер лаборатории химии редких металлов. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук», 690022, г.Владивосток, проспект 100-летия Владивостока, 159, Россия
E-mail: polina.gritsenko.00@inbox.ru

Данилова Сахаяна Николаевна
к.т.н., старший научный сотрудник, постдок; Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К.Аммосова», 677000, г.Якутск, ул. Кулаковского, 46, Россия. Харбинский политехнический университет, район Наньган, ул. Хуанхэ, 73, Харбин, провинция Хэйлунцзян, Китай.
E-mail: dsn.sakhayana@mail.ru

S.B. Yarusova, P.S. Gordienko, A.E. Panasenko, U.V. Kharchenko, I.A. Beleneva, P.V. Gritsenko, S.N. Danilova

BORON PRODUCTION WASTE AS A RAW MATERIAL FOR OBTAINING SORBENTS

Abstract. The article is devoted to studying the possibility of obtaining sorption materials based on calcium silicates from boric acid production waste (borogypsum). Depending on the synthesis conditions of calcium-silicate sorbents (varying temperature and duration), data on their phase composition, density, and specific surface area were obtained. It has been established that the main mechanism of heavy metal ion sorption is cation exchange, which is confirmed by X-ray phase analysis, atomic absorption spectrometry, and elemental analysis. It is shown that the sorption of methylene blue proceeds via a monolayer mechanism and is satisfactorily described by the Langmuir model, while the process kinetics is described by the pseudo-second-order model. The adsorption efficiency of pathogenic and opportunistic microorganisms (*Escherichia coli*, *Bacillus subtilis*) by synthetic calcium silicates was studied: the highest sorption capacity (>90 %) was achieved with respect to *Escherichia coli*, with borogypsum-based samples surpassing the well-known enterosorbent "Belyi Ugol" («White Coal»). The results obtained indicate the prospects of using boron production waste to create sorbents for the purification of aqueous media from heavy metals, dyes, and microorganisms.
Keywords: borogypsum, calcium silicates, sorption, mechanism, kinetics, heavy metals, methylene blue, microorganisms.

For citation: Yarusova S.B., Gordienko P.S., Panasenko A.E., Kharchenko U.V., Beleneva I.A., Gritsenko P.V., Danilova S.N. [Boron production waste as a raw material for the production of sorbents]. *Upravlenie tekhnosferoi,* 2026, vol. 9, issue 3. pp. 741–761. DOI: 10.35634/UdSU.2026.94.80.011

REFERENCES

1. Gladun V.D., Akat'eva L.V., Khol'kin A.I. *Sinteticheskie silikaty kal'tsiya*. [Synthetic Calcium Silicates]. Moscow: IRISBUK, 2011, 232 p. (In Russ.).
2. *Ekologicheskie issledovaniya na Dal'nem Vostoke Rossii: istoriya i sovremennost': monografiya* [Environmental Studies in the Russian Far East: History and Modernity: monograph]. In V.Yu.Tsygankova, S.B.Yarusovoi (eds); *Vladivostokskii gosudarstvennyi universitet. Vladivostok*: Izd-vo VVGU, 2023, 370 p. DOI: https:doi/org/10.24866/0685-5-2022-380.

3. Papynov E.K., Trukhin I.S., Mayorov V.Yu. et al. Sorption of Phosphates on Macroporous Synthetic Calcium Silicates, Doklady Physical Chemistry, 2017, vol. 473. part 2, pp. 61–65. DOI: 10.1134/S0012501617040030.
4. Ma J., Qin G., Zhang Y. et al. Heavy metal removal from aqueous solutions by calcium silicate powder from waste coal fly-ash, Journal of Cleaner Production, 2018, vol. 182, pp. 776–782. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.02.115.
5. Shao N., Li S., Yan F. et al. An all-in-one strategy for the adsorption of heavy metal ions and photodegradation of organic pollutants using steel slag-derived calcium silicate hydrate, Journal of Hazardous Materials, 2020, vol. 382, p. 121120, DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.121120.
6. Qi F., Zhu G., Zhang Y. et al. Eco-utilization of silicon-rich lye: Synthesis of amorphous calcium silicate hydrate and its application for recovering heavy metals, Separation and Purification Technology, 2022, vol. 282, p. 120092, DOI: 10.1016/j.seppur.2021.120092.
7. Liu X., Feng P., Chen J. et al. A critical review on the interaction between calcium silicate hydrate (C-S-H) and different ions, Construction and Building Materials, 2024, vol. 413, 134931, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.134931.
8. Svedaite E., Baltakys K., Levisauskas D. et al. Effect of temperature and P^{5+} ions concentration on the phosphorus adsorption mechanism by synthetic calcium silicate hydrates, Journal of Hazardous Materials Advances, 2026, vol. 22, p. 101159. DOI: 10.1016/j.hazadv.2026.101159.
9. Hashem A.A., Mahmoud S.A., Geioushy R.A. et al. Adsorption of malachite green dye over synthesized calcium silicate nanopowders from waste materials, Materials Science and Engineering: B, 2023, vol. 295, 116605. DOI: 10.1016/j.mseb.2023.116605.
10. Chen Q., Hills C.D., Yuan M. et al. Characterization of carbonated tricalcium silicate and its sorption capacity for heavy metals: A micron-scale composite adsorbent of active silicate gel and calcite, Journal of Hazardous Materials, 2008, vol. 153, no. 1–2, pp. 775–783. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.09.023.
11. Zhang Z., Wang X., Wang H. et al. Removal of Pb(II) from aqueous solution using hydroxyapatite/calcium silicate hydrate (HAP/C-S-H) composite adsorbent prepared by a phosphate recovery process, Chemical Engineering Journal, 2018, vol. 344, pp. 53–61. DOI: 10.1016/j.cej.2018.03.066.
12. Briso A., Quintana G., Ide V. et al. Integrated use of magnetic nanostructured calcium silicate hydrate and magnetic manganese dioxide adsorbents for remediation of an acidic mine water // Journal of Water Process Engineering, 2018. vol. 25, pp. 247–257. DOI: 10.1016/j.jwpe.2018.08.010.

13. Valenzuela F., Quintana G., Briso A. et al. Cu(II), Cd(II), Pb(II) and As(V) adsorption from aqueous solutions using magnetic iron-modified calcium silicate hydrate: Adsorption kinetic analysis, Journal of Water Process Engineering, 2021, vol. 40, p. 101951. DOI: 10.1016/j.jwpe.2021.101951.
14. You W., Hong M., Zhang H. et al. Functionalized calcium silicate nanofibers with hierarchical structure derived from oyster shells and their application in heavy metal ions removal, Phys. Chem. Chem. Phys, 2016, vol. 18, pp. 15564–15573. DOI: 10.1039/c6cp01199c.
15. Lihua L., Li T., Yang G. et al. Synthesis of thiol-functionalized mesoporous calcium silicate and its adsorption characteristics for heavy metal ions, Journal of Environmental Chemical Engineering, 2017, vol. 5, pp. 6201–6215. DOI: 10.1016/j.jece.2017.11.046.
16. El-khalafawy A., Hashem F.S., Hassan H.S. Tracking the Adsorptive properties of modified nano calcium silicate/CuO composite for Cs(I) and Co(II) uptake from waste stream, Microporous and Mesoporous Materials, 2024, vol. 371, 113074. DOI: 10.1016/j.micromeso.2024. 113074.
17. Agourrame H., El Amri A., Ez-zaki H. et al. Synthesis and characterization of a new inorganic material of fluor/hydroxyapatite- C-S-H mixtures from blast furnace slag and their application in the removal of a cationic dye (methyleneblue) in aqueous solution, Inorganic Chemistry Communications, 2025, vol. 175, 114163. DOI: 10.1016/j.inoche.2025.114163.
18. *Kompleksnaja pererabotka borsoderzhashhego mineral'nogo syr'ja i tehnogennyh othodov: monografija* [Comprehensive Processing of Boron-Containing Mineral Raw Materials and Technogenic Waste: a monograph], the team of authors; In P.S. Gordienko (ed); managing editors, In S.B. Jarusova, I.Ju. Buravlev (eds). Vladivostok: Publ. VVGU, 2024, 198 p. DOI: 10.24866/9736-0725-8.
19. Shaw S., Clark S.M., Henderson C.M.B. Hydrothermal formation of the calcium silicate hydrates, tobermorite ($Ca_5Si_6O_{16}(OH)_2 \cdot 4H_2O$) and xonotlite ($Ca_6Si_6O_{17}(OH)_2$): an in situ synchrotron study, Chemical Geology, 2000, vol. 167, issue 1–2, pp. 129–140. DOI: 10.1016/S0009-2541(99)00205-3.
20. Andryushchenko E.N., Dostovalov D.V., Zamaraeva A.V. et al. *Poluchenie tobermorita iz otkhodov bornogo proizvodstva. Materialy 3(74-i) regional'noi itogovoi nauchno-prakticheskoi konferentsii prepodavatelei i studentov BGPU (g. Blagoveshchensk, 24 aprelya 2025 g.).* [Proceedings of the 3rd (74th) Regional Final Scientific and Practical Conference of Teachers and Students of BSPU]. *Blagoveshchensk: Blagoveshchenskii gosudarstvennyi pedagogicheskii universitet,* 2025, pp. 254–256. (In Russ.).

21. Zhang Y.-Q., Radha A.V., Navrotsky A. Thermochemistry of two calcium silicate carbonate minerals: scawtite, $Ca_7(Si_6O_{18})(CO_3)\cdot 2H_2O$, and spurrite, $Ca_5(SiO_4)_2(CO_3)$, Geochimica et Cosmochimica Acta, 2013, vol. 115, pp. 92–99. DOI: 10.1016/j.gca.2013.03.031.
22. Yarusova S.B., Gordienko P.S., Buravlev I.Yu. et al. Chapter 18. The use of ultrasonic treatment in technological processes of complex processing of industrial waste: Energetic insights, Energy Aspects of Acoustic Cavitation and Sonochemistry. Editor(s): Oualid Hamdaoui, Kaouther Kerboua, Elsevier, 2022. pp. 299–313. DOI: 10.1016/B978-0-323-91937-1.00008-6.
23. Shichalin O.O., Yarusova S.B., Ivanov N.P. et al. Calcium silicate solid-state matrices from boric acid production waste for 60Co removal and immobilization by spark plasma sintering, Journal of Water Process Engineering, 2024, vol. 59. 105042. DOI: 10.1016/j.jwpe.2024.105042.
24. 24. Yarusova S.B., Gordienko P.S., Azarova Yu.A. *Issledovanie sorbtsii tyazhelykh metallov sorbentami na osnove silikatov kal'tsiya, poluchennymi iz tekhnogennykh otkhodov pererabotki borsoderzhashchego mineral'nogo syr'ya.* [Investigation of heavy metal sorption by calcium silicate-based sorbents derived from industrial waste generated during the processing of boron-containing mineral raw materials] Collection of materials of the XVI International Scientific and Practical Conference-Competition of Scientific Reports of Students, Postgraduates and Young Researchers "Intellectual Potential of Universities for the Development of the Far Eastern Region of Russia and the APR Countries". Vladivostok: Izd-vo VGUES, 2014, pp. 147–156. (In Russ.).
25. Yarusova S.B., Gordienko P.S., Yudakov A.A. et al. Kinetika sorbtsii ionov tyazhelykh metallov sorbentom, poluchennym iz otkhodov proizvodstva bornoi kisloty [Kinetics of sorption of heavy metal ions by a sorbent obtained from boric acid production waste]. *Khimicheskaya tekhnologiya.* [*Chemical engineering*], 2015, vol. 16, no.10, pp. 620–624. (In Russ.).
26. Li M., Ren Z., Gao H. et al. Preparation of tobermorite onto flux-calcinated diatomite surface and the adsorption properties and mechanism of methylene blue, Desalination and Water Treatment, 2020, vol. 188, pp. 247–256. DOI: 10.5004/dwt.2020.25430.
27. Zhang Y., Jing Z., Li Y. et al. Hydrothermal synthesis of tobermorite from diatomite and its adsorption performance for methylene blue, Materials Research Innovations, 2015, vol. 19: S2-63-S2-69. DOI: 10.1179/1432891715Z.0000000001312.

28. Moreno-Santos A., Rios-Hurtado J.C., Flores-Villaseñor S.E. et al. Hydroxyapatite Growth on Activated Carbon Surface for Methylene Blue Adsorption: Effect of Oxidation Time and $CaSiO_3$ Addition on Hydrothermal Incubation, Applied Sciences, 2023, vol. 13, 77. DOI: 10.3390/app13010077.
29. Vezentsev A.I., Trubitsyn M.A., Kormosh E.V. Montmorillonitovye gliny kak potentsial'nyi sorbent patogennykh veshchestv i mikroorganizmov [Montmorillonite clays as a potential sorbent of pathogenic substances and microorganisms]. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy.* [*Sorption and Chromatographic Processes*], 2012, vol. 12, vol. 6, p. 998. (In Russ.).
30. Kubota M., Nakabayashi T., Matsumoto Y. et al. Selective adsorption of bacterial cells onto zeolites, Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2008, vol. 64(1), p. 88. DOI:10.1016/j.colsurfb.2008.01.012.
31. Li G.L., Zhou C.H., Fiore S. et al. Interactions between microorganisms and clay minerals: New insights and broader applications, Appl. Clay Sci, 2019, vol. 177, p. 91. DOI: 10.1016/j.clay.2019.04.025.
32. Zhao W., Liu X., Huang Q. et al. Interactions of pathogens Escherichia coli and Streptococcus suis with clay minerals, Applied Clay Science, 2012, vol. 69, p. 37. DOI: 10.1016/j.clay.2012.07.003.
33. Kharchenko U.V., Aref'eva O.D., Panasenko A.E. et al. Sorbtsionnye svoistva kremniisoderzhashchikh obraztsov po otnosheniyu k bakteriyam [Sorption properties of silicon-containing samples with respect to bacteria]. *Izvestiya vuzov. Prikladnaya khimiya i biotekhnologiya.* [*Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*], 2020, vol. 10, no. 4, pp. 603–612. (In Russ.).
34. Zemnukhova L.A., Kharchenko U.V., Beleneva I.A. Biomass derived silica containing products for removal of microorganisms from water, International Journal of Environmental Science and Technology, 2015, vol. 12, pp. 1495–1502. DOI 10.1007/s13762-014-0529-8.
35. Nikolaev V.G., Mikhalovskii S.V., Gurina N.M. Sovremennye enterosorbenty i mekhanizmy ikh deistviya [Modern enterosorbents and mechanisms of their action]. *Efferentnaya terapiya.* [*Efferent Therapy*], 2005, vol. 11, no 4, pp. 3–17. (In Russ.).
36. Yarusova S.B., Somova S.N., Kharchenko U.V. et al. Vliyanie uslovii sinteza silikatov kal'tsiya na kinetiku protsessa mikrobiologicheskoi ochistki vodnykh sred [Influence of synthesis conditions of calcium silicates on the kinetics of the microbiological purification of aqueous media]. *Zhurnal neorganicheskoi khimii* [*Russian Journal of Inorganic Chemistry*], 2021, vol. 66, no 8, pp. 1025–1031. DOI: 10.31857/S0044457X21080316 (In Russ.).

Received: 11.09.2026

About the Authors

Yarusova Sofya Borisovna
Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher; Head of the Base Department of Electrochemical and Chemical-Technological Processes (EEPKhT), Vladivostok State University (VSU). Institute of Chemistry, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (IC FEB RAS), 159 100-letiya Vladivostoka Ave., Vladivostok, 690022, Russia; Vladivostok State University, 41 Gogolya St., Vladivostok, 690014, Russia.
E-mail: yarusova_10@mail.ru

Gordienko Pavel Sergeyevich
Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Laboratory. Institute of Chemistry, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (IC FEB RAS), 159 100-letiya Vladivostoka Ave., Vladivostok, 690022, Russia.
E-mail: pavel.gordienko@mail.ru

Panasenko Alexander Evgenievich
Candidate of Chemical Sciences, Senior Researcher, Head of the Laboratory of Rare Metal Chemistry, Institute of Chemistry, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (IC FEB RAS). Institute of Chemistry, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (IC FEB RAS), 159 100-letiya Vladivostoka Ave., Vladivostok, 690022, Russia.
E-mail: panasenko@ich.dvo.ru

Kharchenko Ulyana Valeryevna
Candidate of Chemical Sciences, Researcher, Laboratory of Electrochemical Processes. Institute of Chemistry, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 159 100-letiya Vladivostoka Ave., Vladivostok, 690022, Russia.
E-mail: ulyanakchar@mail.ru

Beleneva Irina Alekseevna
Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Marine Microbiota. A.V. Zhirmunsky National Scientific Center of Marine Biology, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 17 Palchevskogo St., Vladivostok, 690041, Russia.
E-mail: beleneva.vl@mail.ru

Gritsenko Polina Vladimirovna
Engineer, Laboratory of Rare Metal Chemistry. Institute of Chemistry, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 159 100-letiya Vladivostoka Ave., Vladivostok, 690022, Russia.
E-mail: polina.gritsenko.00@inbox.ru

Danilova Sakhayana Nikolaevna
Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Postdoctoral Researcher; M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, 46 Kulakovskogo St., Yakutsk, 677000, Russia. Harbin Institute of Technology, 73 Huanghe St., Nangang District, Harbin, Heilongjiang Province, China.
E-mail: dsn.sakhayana@mail.ru