Геоэкология

DOI: 10.35634/UdSU.2026.80.36.001

УДК 67.08

П.С. Гордиенко, С.Б. Ярусова, С.Н. Данилова

НАПРАВЛЕНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ БОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА: РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫХ УЧЕНЫХ[1]

Аннотация. В статье представлены основные направления исследований по комплексному использованию отходов борного производства, рассмотренные в коллективной монографии авторов, вышедшей в 2024 г. Предложен ряд способов и технологических схем получения функциональных веществ и материалов на основе отходов (аморфный диоксид кремния («белая сажа»), силикаты кальция, сорбенты, наполнители в строительной, полимерной, лакокрасочной отрасли).
Ключевые слова: отходы производства борной кислоты, борогипс, комплексная переработка.

Для цитирования: Гордиенко П.С., Ярусова С.Б., Данилова С.Н. Направления комплексной переработки отходов борного производства: результаты исследований дальневосточных ученых // Управление техносферой: электрон. журнал, 2026. Т. 9. Вып.2. С. 251–271. DOI: 10.35634/UdSU.2026.80.36.001

Введение

Основную роль в становлении российской промышленности по переработке бора сыграло освоение приморских месторождений в середине XX века. Можно уточнить, что началом изучения боросодержащих соединений стал запуск Дальнегорского ГОКа в 1959 г., когда была получена первая партия датолитового концентрата. Это событие послужило толчком для развития всего направления, в том числе по освоению этого сырья. Так, доля дальнегорского

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

сырья в балансе страны быстро росла, а вслед за этим расширялся и ассортимент выпускаемых продуктов [2, 3]. Вплоть до начала экономического спада предприятие выпускало до 26 видов борной продукции, востребованной более чем в 30 отраслях [4]. Пик этого роста пришелся на 1960-е гг., когда борная промышленность получила наиболее интенсивное развитие.

Параллельно с производством формировалась и научная база. В 1977 г. в Институте химии ДВНЦ АН СССР (ныне Институт химии ДВО РАН) была организована профильная лаборатория, занявшаяся изучением свойств боросодержащих соединений [5]. Развитие изучения бора объясняется широтой его практического использования. Бор и его соединения сегодня задействованы в металлургии, стекольной и керамической отраслях. Благодаря своим уникальным свойствам они применяются в атомной энергетике (в сплавах для регулирующих стержней реакторов), ракетной технике, а также в медицине и сельском хозяйстве [1, 5].

После распада СССР минерально-сырьевой комплекс России оказался в глубоком кризисе, вызванном резким экономическим спадом. Основная причина сокращения производства заключалась в переориентации горнодобывающих предприятий преимущественно на экспорт необработанного сырья и продукции первичной переработки, в то время как создание и модернизация мощностей по глубокой переработке отошли на задний план [6]. Подобная стратегия, ориентированная на получение быстрой прибыли от вывоза полезных ископаемых и полуфабрикатов, привела к накоплению огромных объёмов отходов обогащения, содержащих ценные компоненты, которые остаются невостребованными. В итоге это создаёт угрозу утраты значимости данного сектора для экономики регионов. Достижение устойчивого положительного эффекта от использования минерально-сырьевого потенциала возможно исключительно при условии рационального природопользования. Такой подход подразумевает внедрение замкнутых технологических циклов,

обеспечивающих максимально глубокую переработку сырья, а также формирование региональных производственно-сбытовых цепочек готовой продукции с активным вовлечением всех субъектов Дальневосточного федерального округа [7, 8].

На территории Дальнегорского горно-обогатительного комбината за десятилетия эксплуатации накопилось несколько десятков миллионов тонн техногенных гипсосодержащих отходов, которые до сих пор остаются практически невостребованными и не перерабатываются. Развитие научных разработок в области комплексной утилизации крупнотоннажных отходов борнокислотного производства (или борогипса) практически прекратились после начала 1990-х гг. В публикации [9] приведён обзор возможных продуктов и материалов на основе борогипса; среди них выделяются несколько ключевых направлений: строительные композиции, силикатные соединения, многокомпонентные удобрения и сорбционные материалы.

Сотрудниками Института химии ДВО РАН совместно с коллегами из других институтов Дальневосточного отделения РАН, а также Дальневосточного федерального университета, Владивостокского государственного университета, Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова и зарубежными партнёрами выполнен цикл исследований по созданию технологий переработки борсодержащего природного и техногенного сырья. Получен ряд функциональных материалов с разнообразным целевым назначением. Основные результаты представлялись на конференциях различного масштаба (от региональных до международных), опубликованы в рецензируемых журналах, а технические решения защищены патентами. В 2020 г. работа поддержана грантом Правительства Приморского края [9].

В 2022–2023 гг. под воздействием внешнеэкономической ситуации и в рамках политики импортозамещения на государственном уровне принят ряд нормативных документов, задающих вектор развития минерально-сырьевого

комплекса страны. К числу важнейших относятся Перечень поручений Президента РФ от 28.06.2022 № Пр-1130, Постановление Президиума РАН от 11.04.2023 № 70 «О состоянии и перспективах развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации», учреждение Дальневосточного научно-образовательного консорциума «Морская горная отрасль» (2022 г.) и некоторые другие инициативы.

Указанные обстоятельства обусловили потребность в систематизации и обобщении накопленных научных данных, что нашло отражение в коллективной монографии, изданной в 2024 г. [10–12]. Монография структурирована по нескольким основным направлениям: инновационные методы переработки борсодержащего сырья Дальнегорского месторождения, детальный анализ отходов производства борной кислоты с обязательной экологической оценкой, а также отдельный блок, полностью посвящённый технологиям комплексной утилизации борогипса и характеристикам создаваемых на его основе материалов. Над изданием работали коллективы специалистов из Института химии Дальневосточного отделения РАН, Дальневосточного геологического института ДВО РАН, ключевых университетов Дальнего Востока (Дальневосточный федеральный университет, Владивостокский государственный университет, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова), а также учёные Института общей и неорганической химии им. М.Г. Манвеляна Национальной академии наук Армении и Института общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси.

В данной статье приведены основные направления исследований по комплексному использованию борогипса, рассмотренные в коллективной монографии [10].

Получение функциональных веществ и материалов на основе отходов производства борной кислоты

Характеристика отходов производства борной кислоты

Борогипс представляет собой сыпучий материал светло-жёлтого оттенка. По классификации опасности отходов относится к V классу. Суммарная удельная активность естественных радионуклидов (^{40}K, ^{226}Ra, ^{232}Th) в составе отхода составляет всего 17,9 Бк/кг, что не превышает установленных нормативов и допускает использование данного материала при изготовлении любой категории строительной продукции.

Химический состав борогипса представлен преимущественно двуводным сульфатом кальция и кремнезёмом в аморфной форме. Содержание основных компонентов распределяется следующим образом (в масс.%): диоксид кремния – 26–28, оксид кальция – 26–28, сульфат-ион – 38–40. Присутствуют также примеси: оксид железа (1,8–2,0%), оксид алюминия (0,6–0,8%), оксид бора (0,7–1,2%), а также в меньших количествах оксиды марганца (0,2%) и магния (0,1–0,2%) [13, 14].

Состав отходов позволяет предложить ряд способов и технологических схем получения функциональных веществ и материалов на их основе.

Аморфный диоксид кремния («белая сажа»)

Продукт, известный как «белая сажа», представляет собой гидратированную форму диоксида кремния ($mSiO_2 \cdot nH_2O$). Этот материал востребован в качестве адсорбента, а также как активный минеральный наполнитель при производстве лакокрасочных составов, резинотехнических изделий, полимеров, строительных материалов и в других областях. В ходе исследований установлена возможность получения такого продукта при переработке борогипса с использованием гидродифторида аммония NH_4HF_2. После фторирования исходного сырья и последующего водного выщелачивания фильтрат подвергали аммиачному гидролизу. Полученный таким образом

аморфный диоксид кремния характеризовался содержанием основной фазы 97,1 масс.% и удельной поверхностью 199,0 $м^2/г$. Для удаления примесей железа применили метод возгонки, что позволило повысить чистоту продукта до 99,4 масс.% SiO_2 при некотором снижении удельной поверхности – до 98,6 $м^2/г$. Для очищенного возгонкой диоксида кремния изучена способность сорбировать катионный органический краситель – метиленовый синий (МС). Установлено, что максимальная сорбционная ёмкость материала составляет 0,031 ммоль·$г^{-1}$. Экспериментальные данные по сорбции наиболее точно соответствуют изотерме Ленгмюра (коэффициент аппроксимации R^2=0,9964). Причем, кинетические кривые в исследованном интервале времени соответствуют уравнению псевдопервого порядка (R^2=0,9962) [10, 15].

Силикаты кальция

Силикаты и гидросиликаты кальция (обозначаемые как $nCaO \cdot mSiO_2$ и $nCaO \cdot mSiO_2 \cdot pH_2O$) востребованы в производстве стройматериалов, бумажной продукции, лакокрасочных покрытий, пластмасс, композиционных полимерных и металлокерамических систем, а также в качестве сорбентов. Исследователями предложена принципиальная технологическая схема переработки борогипса щелочным методом, позволяющая получать гидросиликаты кальция, волластонит и калийные удобрения [14]. На разработку получен патент [16]. Согласно экспресс-анализу, выполненному Агентством технологического развития, технология синтеза волластонита из отходов производства борной кислоты [17] признана одной из актуальных разработок ДВО РАН, востребованных для российской промышленности.

Выполнено сравнительное изучение эффективности различных способов активации реакционной смеси: ультразвуковой и микроволновой обработки, автоклавного синтеза и традиционного (классического) метода. Критериями оценки служили скорость образования продукта, фазовый состав и морфология получаемых силикатов кальция. Наибольшая скорость синтеза гидросиликата

кальция достигается при использовании микроволнового нагрева. В то же время наиболее полное превращение исходных реагентов характерно для автоклавной обработки [18]. Фазовый состав и микроструктура конечных продуктов существенно зависят от выбранного метода переработки борогипса. Для целенаправленного получения волластонита с ярко выраженной игольчатой формой кристаллов требуется гидротермальная обработка в автоклаве в щелочной среде при температурах 200–220 °C. Процесс обычно длится несколько часов, при этом его продолжительность можно варьировать в широких пределах в зависимости от технических характеристик оборудования. В качестве щелочного реагента оптимально применять гидроксид калия – это позволяет одновременно получать сульфат калия (K_2SO_4), который может быть использован как калийное удобрение. Получение волластонита $CaSiO_3$ в игольчатой форме значительно расширяет спектр его практического использования. Такая морфология обеспечивает эффект микроармирования, повышает механическую прочность, трещиностойкость и износостойкость композитов, что делает материал особенно востребованным в производстве полимерных композиций, керамики, огнеупоров, сухих строительных смесей, лакокрасочных покрытий, асбестозамещающих изделий и ряда других высокотехнологичных продуктов.

Наполнители в строительной отрасли

Продукты переработки борогипса, в особенности различные силикаты кальция, обладают значительным потенциалом для использования в строительных материалах. Экспериментально показано, что замена природного гипса синтезированными из отходов силикатами кальция в цементном камне способствует заметному улучшению его прочностных свойств. Введение в мелкозернистый бетон добавок на основе отходов борного производства – синтетических гидросиликатов кальция и волластонита – приводит к оптимизации ключевых характеристик: возрастает прочность,

существенно снижается водопоглощение, повышается стойкость к циклам замораживания-оттаивания. Такие модификаторы могут быть отнесены к категории перспективных функциональных компонентов бетонных композиций. Эксплуатационные свойства получаемых материалов в значительной мере определяются технологическими параметрами переработки. В частности, температура щелочной активации борогипса (диапазон 25–220 °C) и последующий высокотемпературный обжиг (900–1200 °C) существенно влияют на фазовый состав и морфологию частиц конечных продуктов. Эти структурные особенности напрямую определяют механические показатели мелкозернистого бетона при использовании данных материалов в роли активных наполнителей. В связи с этим установление чётких взаимосвязей «режимы синтеза -микроструктура - влияние на свойства бетона» остаётся важной исследовательской задачей [19–21]. Особое внимание уделено методу получения вяжущего на основе борогипса микроволновой обработки. Данная технология обеспечивает синтез полугидрата сульфата кальция. Введение модифицирующих добавок, состоящих из малеината калия и карбоксиметилцеллюлозы, позволяет почти вдвое повысить прочностные характеристики получаемого вяжущего по сравнению с традиционными методами производства [10].

Наполнители в полимерной отрасли

Исследования подтвердили эффективность использования синтетического волластонита, полученного из отходов переработки борного сырья, в качестве армирующего компонента в полимерных матрицах. Материалами основы выступали сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) и политетрафторэтилен (ПТФЭ) [10, 22–24]. Введение игольчатого волластонита способствует упрочнению полимерной матрицы, о чём свидетельствует увеличение показателей относительного удлинения при разрыве и предела прочности при растяжении у разрабатываемых композитов.

Кроме того, введение волластонита в полимеры существенно повышает износостойкость материалов: скорость массового изнашивания для композитов на основе СВМПЭ снижается в 6 раз, а для композитов на основе ПТФЭ – в 209 раз по сравнению с исходными полимерами [10].

Наполнители для лакокрасочных материалов

В ходе работы оценены перспективы применения силикатов кальция, синтезированных гидротермальным методом из борогипса, в рецептурах лакокрасочных покрытий [10]. Выявлено, что введение гидросиликата кальция вместо $CaCO_3$ в акриловые покрытия положительно сказывается на их механической прочности, не снижая при этом устойчивости к обрастанию и эрозионному износу. Для придания материалу биоцидных свойств выполнена модификация силиката кальция композицией на основе Cu_2O и растительного экстракта. Полученный образец проявил антимикробную активность, причем в отношении некоторых тест-культур она превзошла эффективность чистого коммерческого оксида меди (I), обычно используемого в противообрастающих покрытиях.

Модифицированный силикат кальция апробирован в составе эпоксидных композиций. Его эффективность подтверждена натурными испытаниями в условиях тропического климата: покрытия с введением разработанного наполнителя сохраняли устойчивость к биообрастанию на всём протяжении эксперимента. Полученные данные указывают на перспективность дальнейших исследований, направленных на создание наполнителей для защитных покрытий на основе силикатов кальция [25, 26].

Сорбенты

Силикаты кальция, синтезированные из отходов борного производства в различных режимах (безавтоклавная обработка при 20–25 °С, гидротермальные условия при 118 °С и 220 °С), прошли испытания как сорбционные материалы для извлечения ионов тяжёлых металлов, красителя

метиленового синего, а также клеток модельных условно-патогенных бактерий *Escherichia coli* и *Bacillus subtilis* [10, 27]. Опираясь на ранее полученные данные о сорбционной активности борогипса и его производных по отношению к Sr^{2+} и Co^{2+} [28, 29], была проведена сравнительная оценка двух подходов к созданию керамических матриц для долговременной фиксации радионуклидов ^{60}Co и ^{90}Sr: искровое плазменное спекание и холодное прессование с последующим высокотемпературным обжигом [30].

Разработанный сорбент обладает выдающейся ёмкостью по Co^{2+} (220,8 мг/г). Процесс сорбции кобальта идёт в основном по механизму ионного обмена, в результате чего образуется микропористый предшественник фазы $CaCoSi_2O_6$. Применение искрового плазменного спекания при оптимальной температуре 1000 °C обеспечивает надёжную иммобилизацию ионов Co^{2+} в прочной керамической решётке $CaCoSi_2O_6$ с превосходными механическими характеристиками: плотность 3,33 г/см^3, прочность на сжатие 481 МПа, микротвёрдость ≈ 9,81 ГПа. Полученная керамика характеризуется высокой стойкостью к гидролизу — скорость выщелачивания кобальта не превышает ~10^{-7} г/(см^2·сут), что полностью отвечает требованиям ГОСТ Р 50926-96 и стандарта ANSI/ANS 16.1 для матриц, предназначенных для отверждения высокоактивных радиоактивных отходов [31].

Предложенные технологические схемы синтеза могут быть использованы для модернизации существующих производств борной кислоты и внедрения инновационных решений. Эти разработки открывают перспективы для комплексной переработки борогипса как минерального ресурса, а также для расширения ассортимента выпускаемой продукции. Производство конкурентоспособных отечественных материалов на основе местных техногенных и природных сырьевых источников выступает одним из важнейших направлений укрепления технологической независимости России.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технология борных соединений // Труды Уральского научно-исследовательского химического института «УНИХИМ» / под ред. К. В. Ткачева и др. Вып.40. Свердловск: УНИХИМ, 1976. 91 с.
2. Минералы бора: справочник. / С. В. Малинко, И. И. Халтурина, А. А. Озол, В. М. Бочаров М.: Недра, 1991. С. 232.
3. Красиков И. С. БОР: флагману горной химии Приморья – 40 лет. Хабаровск: Издательский дом «Приамурские ведомости», 1999. 176 с.
4. Блищенко Н. С., Бутенко Т. Ю., Хмельницкая Т. Т. К 40-летию института химии ДвО ран // Вестник ДВО РАН. 2011. №5 (159). С. 3–23.
5. Ткачев К. В., Плышевский Ю. С. Технология неорганических соединений бора. Л.: Химия, 1983. 208 с.
6. Попов В. В., Сафонов Ю. Г. Проблема развития и эффективного использования минерально-сырьевой базы России. М.: ИГЕМ РАН, 2003. 202 с.
7. Архипов Г. И. Минеральные ресурсы горнорудной промышленности Дальнего Востока. Обзор состояния и возможности развития. М.: Горная книга, 2011. 830 с.
8. Приоритетные направления развития поисковых и прикладных научных исследований в области использования в промышленных масштабах отходов добычи и переработки полезных ископаемых / В. А. Чантурия, А. П. Козлов, И. В. Шадрунова, Е. Г. Ожогина // Горная промышленность. 2014. № 1 (113). С. 54–57.
9. Получение и перспективы применения силикатных материалов из промышленных отходов производства борной кислоты: обзор / С. Б. Ярусова, П. С. Гордиенко, С. Н. Данилова, Д. В. Достовалов, И. Г. Жевтун, И. Ю. Буравлев, А. А. Охлопкова, Г. Ф. Крысенко // Управление техносферой. 2023. Т.6. Вып. 3. С. 362–385. DOI: 10.34828/UdSU.2023.43.86.006
10. Комплексная переработка борсодержащего минерального сырья и техногенных отходов: монография / кол. авторов; под науч. ред. д-ра техн. наук, проф. П. С. Гордиенко; отв. ред. С. Б. Ярусова, И. Ю. Буравлев. Владивосток: Изд-во ВВГУ, 2024. 198 с. DOI: 10.24866/9736-0725-8

11. Международная коллективная монография вышла в ВВГУ. [Электронный ресурс]. URL: https://www.vvsu.ru/news/201262/ (дата обращения: 05.04.2025).
12. Учёные-химики о комплексной переработке борсодержащего сырья и техногенных отходов [Электронный ресурс] // Дальневосточный учёный. 2025 № 5 (1761): [сайт]. [2025]. URL: http://www.dvuch.febras.ru/images/newspaper/pdf/2025/5_2025a.pdf (дата обращения: 05.04.2025).
13. Ярусова С. Б., Гордиенко П. С. Комплексная переработка отходов производства борной кислоты // Материалы Международного совещания «Прогрессивные методы обогащения и комплексная переработка природного и техногенного минерального сырья» (Плаксинские чтения – 2014), г. Алматы (Республика Казахстан), 16–19 сентября 2014 г. Караганда: ТОО «Арко», 2014. С. 381–384.
14. Гордиенко П. С., Ярусова С. Б., Колзунов В. А., Сушков Ю. В., Чередниченко А. И., Крысенко Г. Ф., Баринов Н. Н. Получение силикатов кальция из отходов переработки борсодержащего минерального сырья // Химическая технология. 2011. Т. 12. № 3. С. 142–147.
15. Аморфный диоксид кремния из техногенных отходов и его сорбционные свойства / Г. Ф. Крысенко, С. Б. Ярусова, А. Е. Панасенко, П. С. Гордиенко // Технологии переработки отходов с получением новой продукции: материалы V Всероссийской научно-практической конференции, г. Киров, 14–15 ноября 2023 г. Киров: Вятский государственный университет, 2023. С.63–66.
16. Способ комплексной переработки борогипса: патент 2601608 Рос. Федерация, № 2015141651/05. МПК C01B 33/24. / П. С. Гордиенко, С. Б. Ярусова, А. В. Козин, В. А. Степанова, И. А. Шабалин, О. В. Гриванова; заявл. 30.09.2015; опубл. 10.11.16, Бюл. № 31.
17. Способ получения волластонита: патент 2595682 Рос. Федерация, № 2015141614/05. МПК C01B 33/24; C30B 7/10; C30B 29/34; C30B 29/62; B82B 3/00; B82Y 40/00. / П. С. Гордиенко, С. Б. Ярусова, А. В. Козин, В. А. Степанова, И. А. Шабалин, И. Г. Жевтун; заявл. 30.09.2015; опубл. 27.08.16, Бюл. № 24.
18. Исследование кинетики процесса щелочной обработки отходов борного производства при различных условиях / П. С. Гордиенко, С. Б. Ярусова, И. Ю. Буравлев, И. Г. Жевтун // Журнал физической химии. 2021. Т. 95. № 1. С. 23–27. DOI: 10.31857/S004445372101009X
19. Влияние условий синтеза силикатного наполнителя на свойства мелкозернистого бетона / С. Б. Ярусова, П. С. Гордиенко, А. В. Козин, Р. С. Федюк, С. Н. Данилова, Д. В. Достовалов, И. А. Балахнин // Военно-инженерное дело на Дальнем Востоке России:

материалы VI Всероссийской научно-практической конференции. Владивосток: ВУЦ ДВФУ, 2022, С. 153–156.

20. Материал на основе синтетического волластонита и его влияние на функциональные свойства мелкозернистого бетона / П. С. Гордиенко, С. Б. Ярусова, А. В. Козин, В. В. Ивин, В. Е. Силантьев, П. Ю. Лизунова, К. О. Шорников // Перспективные материалы. 2017. № 9. С.40–48.
21. Yarusova S. B., Gordienko P. S., Kozin A. V., Zhevtun I. G., Perfilev A. V. Influence of synthetic calcium silicates on the strength properties of fine-grained concrete, IOP Conf. Series: materials Science and Engineering. 2018, vol. 347, pp. 012041. DOI: 10.1088/1757-899X/347/1/012041
22. Разработка триботехнических материалов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена, наполненного волластонитом из отходов борного производства / С.Б. Ярусова, А.А. Охлопкова, Н.В. Гермогенова, С.Н. Данилова, П.С. Гордиенко // Технологии переработки отходов с получением новой продукции: материалы IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, г. Киров, 30 ноября 2022 г. Киров: Вятский государственный университет, 2022. С.129–132.
23. Модифицирование СВМПЭ волластонитом, синтезированным из отходов борного производства / С.Н. Данилова, С.Б. Ярусова, И.Ю. Буравлев, С.А. Слепцова, Е.Г. Игнатьева, В.Ю. Ягофаров, П.С. Гордиенко, А.А. Охлопкова // Полимерные материалы и технологии. 2021. Т.7. №1. С. 71–82**.** DOI: 10.32864/polymmattech-2021-7-1-71-82
24. Влияние синтетического волластонита с различной морфологией частиц на формирование поверхности трения композитов на основе СВМПЭ / С.Н. Данилова, С.Б. Ярусова, А.А. Охлопкова, П.С. Гордиенко, И.Г. Жевтун // Материаловедение.2025. № 4. С.26–35. DOI: 10.31044 / 1684-579X-2025-0-4-26-35
25. Материал на основе силиката кальция как наполнитель для лакокрасочных покрытий / С.Б. Ярусова, У.В. Харченко, П.С. Гордиенко, С.Н. Данилова, Д.А. Нгуен, И.А. Беленева, Д.Х. Шлык // Журнал неорганической химии. 2025. Т. 70. № 3. С. 475–482.
26. Материал на основе силикатов кальция из борогипса как наполнитель для лакокрасочных покрытий / С.Б. Ярусова, П.С. Гордиенко, С.Н. Данилова, У.В. Харченко, Д.А. Нгуен // Материалы IX Международного симпозиума «Химия и химическое образование», приуроченного к 190-летию Д.И. Менделеева, и Третьей молодежной школы по радиоэкологии, посвященной имени выдающегося ученого Дальнего Востока В.А. Авраменко. Владивосток: Издательство ДВФУ, 2024.С.31–32.

27. Потенциал использования синтетических силикатов кальция для очистки водных сред от различных поллютантов (глава 24) / С.Б. Ярусова, П.С. Гордиенко, А.Е. Панасенко, У.В. Харченко, И.А. Беленева, Е.А. Нехлюдова // 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. ISBN 978-5-9736-0685-5; DOI: 10.24866/0685-5-2022-380
28. Gordienko P.S., Yarusova S.B., Krysenko G.F., Kharchenko V.I., Cherednichenko A.I. Boron-containing wastes from mineral processing as a sorbent for Sr^{2+} ion removal from aqueous solutions, Pacific science review. 2012, vol.14, no. 3, pp. 269–274.
29. Сорбционные свойства материалов на основе силикатов кальция по отношению к ионам Co^{2+} / П.С. Гордиенко, С.Б. Ярусова, С.Б. Буланова, А.П. Супонина, Н.В. Зарубина, В.Ю. Майоров // Химическая технология. 2011. Т. 12. № 5. С.282–290.
30. Техногенные отходы и материалы на их основе как сырье для получения керамических матриц для иммобилизации кобальта-60 и стронция-90 / О.О. Шичалин, А.С. Дикая, С.Б. Ярусова, Н.П. Иванов, А.И. Иванец, И.Ю. Буравлев, С.Б. Буланова, А.А. Белов, Е.К. Папынов, П.С. Гордиенко // XXII Менделеевский съезд по общей и прикладной химии, 7-12 октября, 2024, Федеральная территория ≪Сириус≫, Россия. Сборник тезисов докладов в 7 томах. Том 2. М.: ООО «Адмирал Принт», 2024. С.187.
31. Shichalin O.O., Yarusova S.B., Ivanov N.P., Papynov E.K., Belov A.A., Azon S.A., Buravlev I.Yu, Myagchilov A.V., Fedorets A.N., Rastorguev V.L., Zernov Ya.G., Budnitskiy S.Yu., Mayorov V.Yu, Gridasova E.A., Tananaev I.G., Ivanets A.I., Gordienko P.S. Calcium silicate solid-state matrices from boric acid production waste for ^{60}Co removal and immobilization by spark plasma sintering, Journal of Water Process Engineering. 2024, vol. 59, pp. 105042. DOI: 10.1016/j.jwpe.2024.105042

Поступила в редакцию: 03.02.26

Сведения об авторах

Ярусова Софья Борисовна
к.х.н., доцент, старший научный сотрудник; зав. базовой кафедрой ЭЭПХТ ВВГУ; Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук (ФГБУН ИХ ДВО РАН), пр-т 100-летия Владивостока, 159, Владивосток, 690022, Россия; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Владивостокский государственный университет (ФГБОУ ВО «ВВГУ»), ул. Гоголя, 41, Владивосток, 690014, Россия
E-mal: 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 (ИХ ДВО РАН), пр-т 100-летия Владивостока, 159, Владивосток, 690022, Россия.
E-mail: pavel.gordienko@mail.ru;

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

P.S. Gordienko, S.B. Yarusova, S.N. Danilova

DIRECTIONS FOR INTEGRATED PROCESSING OF BORON PRODUCTION WASTE: RESEARCH RESULTS BY FAR EASTERN SCIENTISTS

Annotation. The article presents the main directions of research on the complex use of boric acid production waste, considered in the authors‘ collective monograph, published in 2024. A number of methods and technological schemes for obtaining functional substances and materials on the basis of waste (amorphous silicon dioxide (’white soot"), calcium silicates, sorbents, fillers in construction, polymer, paint and varnish industry) are proposed.
Key words: boric acid production waste, borogypsum, complex processing, functional materials.

For citation: Gordienko P.S., Yarusova S.B., Danilova S.N. [Directions for integrated processing of boron production waste: research results by far eastern scientists] *Upravlenie tekhnosferoi,* 2026, vol. 9, issue 2, pp. 251–271. DOI: 10.35634/UdSU.2026.80.36.001. (In Russ.).

REFERENCES

1. *Tehnologija bornyh soedinenij* [Technology of boron compounds]. Trudy Ural'skogo nauchno-issledovatel'skogo himicheskogo instituta «UNIHIM» / pod red. K.V. Tkacheva i dr., vol. 40. Sverdlovsk: UNIHIM, 1976, 91 p. (In Russ.).
2. Malinko S.V., Halturina I.I., Ozol A.A., Bocharov V.M. *Mineraly bora: Spravochnik* [Boron minerals: Reference book]. Moscow: Nedra, 1991, P. 232. (In Russ.).
3. Krasikov I.S. *BOR: flagmanu gornoi khimii Primor'ya – 40 let* [BOR: the flagship of Primorsky Krai's mining chemistry - 40 years old]. Khabarovsk: Izdatel'skii dom «Priamurskie vedomosti», 1999, 176 p. (In Russ.).
4. Blishhenko N.S., Butenko T.Ju., Hmel'nickaja T.T. K 40-letiju instituta himii DvO Ran [To the 40th anniversary of the Institute of Chemistry of the Far Eastern Branch of RAS]. *Vestnik DVO RAN [Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences]*. 2011, no. 5 (159). pp. 3–23. (In Russ.).
5. Tkachev K.V., Plyshevskij Ju. S. *Tehnologija neorganicheskih soedinenij bora* [Technology of inorganic boron compounds]. L.: Himija, 1983, 208 p. (In Russ.).
6. Popov V.V., Safonov Ju.G. *Problema razvitija i jeffektivnogo ispol'zovanija mineral'no-syr'evoj bazy Rossii* [Problem of development and effective use of mineral raw material base of Russia]. Moscow: IGEM RAN, 2003, 202 p. (In Russ.).

7. Arkhipov G.I. *Mineral'nye resursy gornorudnoj promyshlennosti Dal'nego Vostoka. Obzor sostojanija i vozmozhnosti razvitija* [Mineral resources of the mining industry of the Far East. Review of the state and opportunities for development]. Moscow: Gornaja kniga, 2011, 830 p. (In Russ.).
8. Chanturija V. A., Kozlov A. P., Shadrunova I. V., Ozhogina E. G. Prioritetnye napravlenija razvitija poiskovyh i prikladnyh nauchnyh issledovanij v oblasti ispol'zovanija v promyshlennyh masshtabah othodov dobychi i pererabotki poleznyh iskopaemyh [Priority directions of development of prospecting and applied scientific research in the field of industrial scale utilisation of mining and mineral processing wastes]. *Gornaja promyshlennost'* [*Mining Industry*]. 2014, no. 1 (113), pp. 54–57. (In Russ.).
9. Yarusova S. B., Gordienko P. S., Danilova S. N., Dostovalov D. V., Zhevtun I. G., Buravlev I. Ju., Ohlopkova A. A., Krysenko G. F. Poluchenie i perspektivy primenenija silikatnyh materialov iz promyshlennyh othodov proizvodstva bornoj kisloty: obzor [Production and application prospects of silicate materials from industrial wastes of boric acid production: a review]. *Upravlenie tehnosferoj* [*Technosphere Management*]. 2023, vol.6, issue 3, pp. 362–385. DOI: 10.34828/UdSU.2023.43.86.006 (In Russ.).
10. *Kompleksnaja pererabotka borsoderzhashhego mineral'nogo syr'ja i tehnogennyh othodov: monografija* [Complex processing of boron-containing mineral raw materials and technogenic wastes: a monograph] / kol. avtorov ; pod nauch. red. d-ra tehn. nauk, prof. P. S. Gordienko; otv. red. S. B. Yarusova, I. Yu. Buravlev. Vladivostok: Izd-vo VVGU, 2024, 198 p. DOI: 10.24866/9736-0725-8 (In Russ.).
11. *Mezhdunarodnaja kollektivnaja monografija vyshla v VVGU* [International collective monograph published at VVSU]. Available at: https://www.vvsu.ru/news/201262/ (accessed 05.04.2025). (In Russ.).
12. *Uchjonye-himiki o kompleksnoj pererabotke borsoderzhashhego syr'ja i tehnogennyh othodov* [Scientists-chemists about complex processing of boron-containing raw materials and technogenic wastes]. *Dal'nevostochnyj uchjonyj* [*Far East scientist*]. 2025, no. 5 (1761). Available at: http://www.dvuch.febras.ru/images/newspaper/pdf/2025/5_2025a.pdf (accessed 05.04.2025). (In Russ.).
13. Yarusova S.B., Gordienko P.S. Kompleksnaya pererabotka otkhodov proizvodstva bornoi kisloty. *Materialy Mezhdunarodnogo soveshchaniya «Progressivnye metody obogashcheniya i kompleksnaya pererabotka prirodnogo i tekhnogennogo mineral'nogo syr'ya» (Plaksinskie chteniya – 2014)* [Proceedings of the International Workshop «Progressive Methods of

Enrichment and Integrated Processing of Natural and Technogenic Minerals» (Plaksin Readings - 2014)]. Karaganda, 2014, pp. 381–384. (In Russ.).

14. Gordienko P.S., Yarusova S.B., Kolzunov V.A., Sushkov Yu.V., Cherednichenko A.I., Krysenko G.F., Barinov N.N. Poluchenie silikatov kal'tsiya iz otkhodov pererabotki borsoderzhashchego mineral'nogo syr'ya [Production of calcium silicates from boron-containing mineral processing waste]. *Khimicheskaya tekhnologiya* [*Chemical engineering*]. 2011, vol. 12, no.3, pp. 142–147. (In Russ.).
15. Krysenko G.F., Yarusova S.B., Panasenko A.E., Gordienko P.S. Amorfnyj dioksid kremnija iz tehnogennyh othodov i ego sorbcionnye svojstva. *Tehnologii pererabotki othodov s polucheniem novoj produkcii : materialy V Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii* [Technologies of waste processing with obtaining new products: proceedings of the V All-Russian Scientific and Practical Conference]. Kirov: Vjatskij gosudarstvennyj universitet, 2023. pp.63–66. (In Russ.).
16. *Sposob kompleksnoi pererabotki borogipsa* [Method of complex processing of borogypsum]: Patent 2601608 Rossiiskaya Federatsiya, no. 2015141651/05MPK C01B 33/24. / P.S. Gordienko, S.B. Yarusova, A.V. Kozin, V.A. Stepanova, I.A. Shabalin, O.V. Grivanova; zayavl. 30.09.2015 ; opubl. 10.11.16, Byul. № 31. (In Russ.).
17. *Sposob polucheniya vollastonita* [Method for obtaining wollastonite]. Patent 2595682 Rossiiskaya Federatsiya, no. 2015141614/05, MPK C01B 33/24; C30B 7/10; C30B 29/34; C30B 29/62; B82B 3/00; B82Y 40/00. / P.S. Gordienko, S.B. Yarusova, A.V. Kozin, V.A. Stepanova, I.A. Shabalin, I.G. Zhevtun; zayavl. 30.09.2015; opubl. 27.08.16, Byul. № 24. (In Russ.).
18. Gordienko P.S., Yarusova S.B., Buravlev I.Yu., Zhevtun I.G. Issledovanie kinetiki processa shhelochnoj obrabotki othodov bornogo proizvodstva pri razlichnyh uslovijah [Study of the kinetics of the process of alkaline treatment of boron production waste under different conditions]. *Zhurnal fizicheskoj himii* [*Journal of Physical Chemistry*]. 2021, vol. 95, no.1, pp. 23–27. DOI: 10.31857/S004445372101009X (In Russ.).
19. Yarusova S.B., Gordienko P.S., Kozin A.V., Fediuk R.S., Danilova S.N., Dostovalov D.V., Balakhnin I.A. Vlijanie uslovij sinteza silikatnogo napolnitelja na svojstva melkozernistogo betona. *Voenno-inzhenernoe delo na Dal'nem Vostoke Rossii: Materialy VI Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii* [Military Engineering in the Far East of Russia: Proceedings of the VI All-Russian Scientific and Practical Conference]. Vladivostok: VUC FEFU, 2022, pp. 153–156. (In Russ.).
20. Gordienko P.S., Yarusova S.B., Kozin A.V., Ivin V.V., Silant'ev V.E., Lizunova P.Yu., Shornikov K.O. Material na osnove sinteticheskogo vollastonita i ego vlijanie na funkcional'nye

svojstva melkozernistogo betona [Material based on synthetic wollastonite and its effect on the functional properties of fine-grained concrete]. *Perspektivnye materialy* [*Perspective Materials*]. 2017, no. 9, pp.40–48. (In Russ.).

21. Yarusova S. B., Gordienko P. S., Kozin A. V., Zhevtun I. G., Perfilev A. V. Influence of synthetic calcium silicates on the strength properties of fine-grained concrete // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering,* 2018, vol. 347, pp. 012041. DOI: 10.1088/1757-899X/347/1/012041 (In Russ.).
22. Yarusova S.B., Okhlopkova A.A., Germogenova N.V., Danilova S.N., Gordienko P.S. Razrabotka tribotehnicheskih materialov na osnove sverhvysokomolekuljarnogo polijetilena, napolnennogo vollastonitom iz othodov bornogo proizvodstva. *Tehnologii pererabotki othodov s polucheniem novoj produkcii: materialy IV Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem* [Waste processing technologies with the production of new products: Proceedings of the IV All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation]. Kirov: Vjatskij gosudarstvennyj universitet, 2022, pp.129–132. (In Russ.).
23. Danilova S.N., Yarusova S.B., Buravlev I.Yu., Sleptsova S.A., Ignat'eva E.G., Yagofarov V.Yu., Gordienko P.S., Okhlopkova A.A. Modificirovanie SVMPJe vollastonitom, sintezirovannym iz othodov bornogo proizvodstva [Modification of UHMWPE by wollastonite synthesised from boron production waste]. *Polimernye materialy i tehnologii* [*Polymer materials and technologies*]. 2021, vol.7, no.1, pp. 71–82. DOI: 10.32864/polymmattech-2021-7-1-71-82 (In Russ.).
24. Danilova S.N., Yarusova S.B., Okhlopkova A.A., Gordienko P.S., Zhevtun I.G. Vlijanie sinteticheskogo vollastonita s razlichnoj morfologiej chastic na formirovanie poverhnosti trenija kompozitov na osnove SVMPJe [Influence of synthetic wollastonite with different particle morphology on the formation of the friction surface of composites based on UHMWPE]. *Materialovedenie* [*Materials Science*].2025, no. 4, pp.26–35. DOI: 10.31044 / 1684-579X-2025 0 4-26-35 (In Russ.).
25. Yarusova S.B., Kharchenko U.V., Gordienko P.S., Danilova S.N., Nguen D.A., Beleneva I.A., Shlyk D.Kh. Material na osnove silikata kal'cija kak napolnitel' dlja lakokrasochnyh pokrytij [Calcium silicate-based material as a filler for paint and varnish coatings]. *Zhurnal neorganicheskoj himii* [*Journal of Inorganic Chemistry*]. 2025, vol. 70, no. 3, pp. 475–482. (In Russ.).

26. Yarusova S.B., Gordienko P.S., Danilova S.N., Kharchenko U.V., Nguen D.A. Material na osnove silikatov kal'cija iz borogipsa kak napolnitel' dlja lakokrasochnyh pokrytij. *Materialy IX Mezhdunarodnogo simpoziuma «Himija i himicheskoe obrazovanie», priurochennogo k 190-letiju D.I. Mendeleeva, i Tret'ej molodezhnoj shkoly po radiojekologii, posvjashhennoj imeni vydajushhegosja uchenogo Dal'nego Vostoka V.A. Avramenko* [Proceedings of the IX International Symposium «Chemistry and Chemical Education», timed to the 190th anniversary of D.I. Mendeleev, and the Third Youth School on radioecology, dedicated to the outstanding scientist of the Far East V.A. Avramenko]. Vladivostok: Izdatel'stvo FEFU, 2024, pp.31–32. (In Russ.).
27. Ekologicheskie issledovaniya na Dal'nem Vostoke Rossii: istoriya i sovremennost': monografiya [Environmental Studies in the Russian Far East: History and Modernity: Monograph] / pod red. V.Yu. Tsygankova, S.B. Yarusovoi; Vladivostokskii gosudarstvennyi universitet. Vladivostok: Izd-vo VVGU, 2023, 370 p. ISBN 978-5-9736-0685-5; DOI: https:doi/org/10.24866/0685-5-2022-380. (In Russ.).
28. Gordienko P.S., Yarusova S.B., Krysenko G.F., Kharchenko V.I., Cherednichenko A.I. Boron-containing wastes from mineral processing as a sorbent for Sr^{2+} ion removal from aqueous solutions // Pacific science review, 2012, vol.14, no. pp. 269–274.
29. Gordienko P.S., Yarusova S.B., Bulanova S.B., Suponina A.P., Zarubina N.V., Mayorov V.Yu. Sorbcionnye svojstva materialov na osnove silikatov kal'cija po otnosheniju k ionam Co^{2+} [Sorption properties of materials based on calcium silicates in relation to Co^{2+} ions]. *Himicheskaja tehnologija* [*Chemical Technology*]. 2011, vol. 12, no. 5, pp.282–290. (In Russ.).
30. 30. Shichalin O.O., Dikaja A.S., Yarusova S.B., Ivanov N.P., Ivanets A.I., Buravlev I.Yu., Bulanova S.B., Belov A.A., Papynov E.K., Gordienko P.S. Tehnogennye othody i materialy na ih osnove kak syr'e dlja poluchenija keramicheskih matric dlja immobilizacii kobal'ta-60 i stroncija-90. *XXII Mendeleevskij s'ezd po obshhej i prikladnoj himii. Sbornik tezisov dokladov* [XXII Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry. Collection of abstracts], vol. 2. Moscow: OOO «Admiral Print», 2024, P.187. (In Russ.).
31. Shichalin O.O., Yarusova S.B., Ivanov N.P., Papynov E.K., Belov A.A., Azon S.A., Buravlev I.Yu, Myagchilov A.V., Fedorets A.N., Rastorguev V.L., Zernov Ya.G., Budnitskiy S.Yu., Mayorov V.Yu, Gridasova E.A., Tananaev I.G., Ivanets A.I., Gordienko P.S. Calcium silicate solid-state matrices from boric acid production waste for ^{60}Co removal and immobilization by spark plasma sintering, Journal of Water Process Engineering. 2024, vol. 59, pp. 105042. DOI: 10.1016/j.jwpe.2024.105042

Received: 03.02.26

About the Authors

Yarusova Sofya Borisovna
Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher; Head. the Basic Department of Electrical Engineering at the All-Russian State University; Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Chemistry of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (FGBUN IM FEB RAS), 159 100th Anniversary of Vladivostok Ave., Vladivostok, 690022, Russia; Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Vladivostok State University (FGBOU HE "All-Russian State University"), Gogol St. 41, Vladivostok, 690014, Russia
E-mal: yarusova_10@mail.ru

Gordienko Pavel Sergeevich
Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Laboratory; Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Chemistry of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (THEIR Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences), 159 100th Anniversary of Vladivostok Ave., Vladivostok, 690022, Russia.
E-mail: pavel.gordienko@mail.ru

Danilova Sakhayana Nikolaevna
Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Postdoc, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Northeastern Federal University named after M.K. Ammosov", 46 Kulakovsky St., Yakutsk, 677000, Russia. Harbin Polytechnic University, Nangang District, 73 Huanghe St., Harbin, Heilongjiang Province, China.
E-mail: dsn.sakhayana@mail.ru