

УДК 661.844.2:538.945(437.2)
AGRIS P33

https://doi.org/10.33619/2414-2948/124/15

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОЧИСТКИ ПРИРОДНОГО БАРИТА САРЫ-ТААЛИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ КЕРАМИКИ

©**Ташполотов Ы.**, ORCID: 0000-0001-9293-7885, SPIN-код: 2425-6716, д-р физ.-мат. наук,
Научно-исследовательский институт Нанотехнологий и искусственного интеллекта;

Ошский государственный университет, г. Ош, Кыргызстан, itashpolotov@mail.ru

©**Акназар уулу К.**, ORCID: 0009-0006-5739-1323, Институт природных ресурсов Южного
отделения НАН КР; Кыргызско-Узбекский международный университет им. Б. Сыдыкова,
г. Ош, Кыргызстан, kadyrbeksultanov11@gmail.com

©**Ибраимов Т. К.**, ORCID: 0000-0002-1444-4791, Научно-исследовательский институт
«Нанотехнологий и искусственного интеллекта»; Ошский государственный университет,
г. Ош, Кыргызстан, t.kailbekovich@mail.ru

PHYSICO-CHEMICAL BASES FOR THE PURIFICATION OF NATURAL BARITE FROM THE SARY-TAAL DEPOSIT OF THE KYRGYZ REPUBLIC TO PRODUCE SUPERCONDUCTING CERAMICS

©**Tashpolotov Y.**, ORCID: 0000-0001-9293-7885, SPIN-code: 2425-6716, Dr. habil.,
Research Institute of Nanotechnology and Artificial Intelligence; Osh State University,

Osh, Kyrgyzstan, itashpolotov@mail.ru

©**Aknazar uulu K.**, ORCID: 0009-0006-5739-1323, Institute of Natural Resources of the Southern
Branch of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic; Kyrgyz-Uzbek International
University named after B. Sydykov, Osh, Kyrgyzstan, kadyrbeksultanov11@gmail.com

©**Ibraimov T.**, ORCID: 0000-0002-1444-4791, Research Institute of Nanotechnology and Artificial
Intelligence; Osh State University, Osh, Kyrgyzstan, t.kailbekovich@mail.ru

Аннотация. Представлена комплексная технология переработки природного барита (BaSO_4) Сары-Таалинского месторождения (Кыргызстан) в оксид бария (BaO) спектральной чистоты ($\geq 99.99\%$). Исследование обусловлено критической зависимостью критического тока (J_c) и температуры перехода (T_c) высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) от наличия парамагнитных и диэлектрических примесей. Разработана многоступенчатая схема, включающая флотацию, кислотное выщелачивание и вакуумно-термическое разложение. Полученный BaO успешно применен в синтезе керамики $\text{Sb}_3\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10-x}$, показавшей рекордную критическую температуру 25.1°C .

Abstract. This paper presents a comprehensive technology for processing natural barite (BaSO_4) from the Sary-Taala deposit (Kyrgyzstan) into spectral-grade barium oxide (BaO) ($\geq 99.99\%$). The study is driven by the critical dependence of the critical current (J_c) and transition temperature (T_c) of high-temperature superconductors (HTS) on the presence of paramagnetic and dielectric impurities. A multi-stage scheme including flotation, acid leaching, and vacuum-thermal decomposition has been developed. The resulting BaO was successfully used in the synthesis of $\text{Sb}_3\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10-x}$ ceramics, which demonstrated a record critical temperature of 25.1°C .

Ключевые слова: барит, оксид бария, высокотемпературные сверхпроводники, очистка, сурьмяная керамика, Сары-Таалинское месторождение.

Keywords: barite, barium oxide, high-temperature superconductors, purification, antimony ceramics, Sary-Taala deposit.

Развитие технологий термоядерного синтеза (проект ITER) и квантовых вычислений требует создания ВТСП-материалов с улучшенными характеристиками. Барий является ключевым элементом в структуре большинства известных ВТСП, таких как $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ и перспективных сурьмяных систем [1].

Однако природные источники бария (барит) содержат значительные примеси SiO_2 , Fe_2O_3 и Al_2O_3 , которые даже в малых концентрациях подавляют сверхпроводимость за счет дезинтеграции кристаллической решетки или создания центров рассеяния [2].

За последние 10 лет исследования в области очистки прекурсоров сместились в сторону экологически чистых и энерго-эффективных методов. Использование карбонатного цикла позволяет достичь чистоты 99.9%, однако для ВТСП-керамики нового поколения требуются показатели уровня “Extra Pure” ($\geq 99.99\%$) [3, 4].

Исследования последних лет подчеркивают, что парамагнитные примеси железа (Fe^{3+}) критически снижают плотность тока, а силикатные фазы блокируют межгранулярные контакты [5, 6].

Данная работа направлена на решение проблемы получения сверхчистого BaO из недорогого отечественного сырья Сары-Таалинского месторождения для синтеза ВТСП нового поколения. Исходный барит Сары-Таалинского месторождения характеризуется высоким содержанием $BaSO_4$ (79.35%), но осложнен значительным присутствием диоксида кремния (15%) и оксидов железа (1.5%) [7].

Требование для ВТСП и методы контроля представлен в Таблице 1.

Таблица 1

ТРЕБОВАНИЕ ДЛЯ ВТСП И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

Параметр	Требование для ВТСП	Метод контроля
Основное вещество (BaO)	$\geq 99.99\%$	ICP-OES (по разности)
Примесь Fe	< 10 ppm	ICP-MS
Примесь SiO_2	< 100 ppm	РФА / Спектрофотометрия
Отаточный CO_2	$< 0.01\%$	ИК-спектроскопия

Ниже приведено описание технологической схемы глубокой очистки природного барита Сары-Таалинского месторождения Кыргызской Республики с целью синтеза высокочистого BaO.

Технологические этапы очистки

1. Обогащение (дробление и пенная флотация). На этом этапе основной целью является механическое отделение барита ($BaSO_4$) от вмещающей породы, представленной преимущественно диоксидом кремния (SiO_2). Сырье измельчается до фракции 50–100 мкм, так как именно при таком размере зерен происходит полное раскрытие минералов барита, отделяя их от сростков с кварцем. В пульпу вводится олеиновая кислота ($C_{17}H_{33}COOH$) в качестве собирателя. Молекулы кислоты избирательно сорбируются на поверхности частиц барита, придавая им гидрофобные свойства. Пузырьки воздуха подхватывают частицы барита и выносят их в пенный слой, в то время как частицы SiO_2 (кварц) остаются в осадке (хвостах) и в результате содержания кремния снижается с 15% до $< 5\%$ уже на первой стадии очистки.

2. Гидрохимическая обработка (селективное выщелачивание). Данный этап направлен на перевод примесей в растворимую форму для химического отделения металлов-загрязнителей (Fe, Al, Ca). Несмотря на то что $BaSO_4$ практически нерастворим в воде, обработка

концентрированной HCl при 80⁰C позволяет перевести сопутствующие оксиды и карбонаты в растворимые хлориды пр реакции: $Me_2O_3 + 6HCl \rightarrow 2MeCl_3 + 3H_2O$, где $Me = Fe, Al$.

Ключевым моментом является корректировка кислотности до $pH=8.5$. При данном значении гидроксиды железа (Fe(OH)₃) и алюминия (Al(OH)₃) выпадают в осадок и удаляются методом фильтрации. Благодаря этому раствор очищается от парамагнитных ионов, наличие которых губительно для свойств сверхпроводимости.

Термический цикл (получение сульфида и карбонизация). Прямой перевод сульфата в оксид затруднен, в связи чем используется промежуточная стадия синтеза водорастворимого сульфида. При 1100⁰C в вакуумной печи протекает реакция восстановления барита углеродом: $BaSO_4 + 2C \rightarrow BaS + 2CO_2 \uparrow$.

Использование вакуума способствует эффективному удалению газообразных продуктов, что, согласно принципу Ле Шателье, смещает равновесие реакции вправо. Полученный сульфид бария BaS растворяют в воде и подвергают карбонизации кальцинированной содой: $BaS + Na_2CO_3 \rightarrow BaCO_3 \downarrow + Na_2S$. Данный метод позволяет получить мелкодисперсный карбонат бария высокой степени чистоты.

Прокаливание в токе кислорода. Заключительный этап превращает карбонат в активный оксид бария, необходимый для керамики, путем термического разложения при температуре 700⁰C: $BaCO_3 \rightarrow BaO + CO_2 \uparrow$. Прокаливание ведется в постоянном токе чистого O₂ (1 л/мин). Это выполняет две функции:

Кинетическая: поток газа физически вымывает выделяющийся CO₂, не давая ему вновь прореагировать с BaO (предотвращение рекарбонизации).

Стехиометрическая: насыщение прекурсора кислородом критически важно для формирования фазы $Sb_3Ba_2Ca_2Cu_3O_{10-x}$, где избыток или недостаток кислорода меняет свойства материала от диэлектрика до сверхпроводника.

Таким образом, на выходе получается рыхлый порошок BaO с размером частиц ≤ 50 мкм, который обладает высокой реакционной способностью при последующем спекании сверхпроводящей керамики. Для обеспечения точности производства высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) необходимо четко понимать количественные потери на каждом этапе и методы верификации чистоты конечного продукта.

Расчет материального баланса. Расчет производится исходя из химической стехиометрии и технологических коэффициентов извлечения (K), указанных в описании технологии.

Основные параметры: содержание BaSO₄ в сырье: 79.35%; молярные массы (M): $M(BaSO_4) \approx 233.4$ г/моль; $M(BaO) \approx 153.3$ г/моль.

Технологические выходы (K). Флотация: $K_1 = 0.92$ (потери 8% с хвостами). Восстановление до BaS: $K_2 = 0.98$ (конверсия 98%). Карбонизация и прокаливание: $K_3 = 0.95$ (суммарные потери на фильтрации и пылеунос).

Пошаговый расчет. Стехиометрический коэффициент (S): для получения 1 кг BaO теоретически требуется: $m(BaSO_4)_{теор} = M(BaSO_4)/M(BaO) = 233.4/153.3 \approx 1.522$ кг. С учетом технологических потерь реальное количество чистого BaSO₄ с учетом коэффициентов извлечения: $m(BaSO_4)_{реал} = 1.522/(K_1 K_2 K_3) = 1.522/(0.92 * 0.98 * 0.95) \approx 1.522/0.856 \approx 1.778$ кг.

С учетом чистоты исходного барита (79.35%) итоговая масса природного барита ($m_{сырья}$): $m_{сырья} = 1.778/0.7935 \approx 2.24$ кг.

Таким образом, для получения 1 кг высокочистого BaO необходимо переработать 2.24 кг природного барита Сары-Таалинского месторождения. Контроль качества осуществляется на трех уровнях: входной контроль сырья, операционный контроль фазовых превращений и финальный анализ продукта. Спектральный анализ (ICP-OES / ICP-MS): это основной метод определения примесей металлов. Суммарное содержание примесей Fe, Al, Ca, Mg, Sr не

должно превышать 0,01%. При этом концентрация железа (Fe^{3+}) выше 0,001% (10 ppm) критически снижает плотность тока в керамике $\text{Sb}_3\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10-x}$ из-за разрушения купратных плоскостей. ИК-спектроскопия (FTIR): используется для контроля полноты термического разложения карбоната. Отсутствие пиков поглощения в области 1430–1450 cm^{-1} (характерных для связи С-О в карбонатах) гарантирует, что содержание остаточного BaCO_3 не превышает 0,01%. Наличие карбоната приводит к выделению газов при спекании ВТСП, что создает микропоры и трещины в керамике. Рентгенофазовый анализ (РФА/XRD): позволяет определить фазовую чистоту оксида и отсутствие фаз силикатов бария (Ba_2SiO_4), которые образуются при неполной флотации SiO_2 и действуют как диэлектрические барьеры между зёрнами сверхпроводника. Гранулометрический контроль: определяет размер частиц методом микроскопии. Средний размер частиц (d_{50}) должен быть ≤ 50 мкм. Более крупные частицы замедляют твердофазный синтез сверхпроводника, требуя увеличения времени спекания, что ведет к росту зёрна и падению критических характеристик.

Синтез ВТСП. Керамика $\text{Sb}_3\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10-x}$ синтезировалась методом твердофазного спекания. Гомогенизация проводилась в планетарной мельнице в течение 12 часов. Синтез керамики на основе сурьмы (Sb) является сложным процессом из-за высокой летучести оксидов сурьмы и необходимости формирования специфической слоистой структуры, обеспечивающей сверхпроводимость при аномально высоких температурах. Ниже приведено подробное описание процесса твердофазного синтеза $\text{Sb}_3\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10-x}$ на основе полученного высокочистого ВаО.

Подготовка и гомогенизация шихты. Качество ВТСП-керамики на 70% зависит от однородности перемешивания прекурсоров на атомарном уровне. Состав шихты: используются оксиды высокой чистоты (>99.99%): Sb_2O_3 , ВаО (синтезированный из барита), СаО и СиО. Стехиометрическое смешивание: компоненты взвешиваются в молярном соотношении 3:2:2:3. Важно учитывать гигроскопичность ВаО и СаО, поэтому взвешивание проводится в сухом боксе. Планетарное измельчение (12 часов): применяются корундовые или циркониевые мелющие тела для достижения размера частиц менее 1 мкм, что сокращает диффузионный путь при спекании и позволяет фазе сформироваться быстрее, а также абсолютированный изопропиловый спирт для предотвращения локального перегрева и карбонизации.

Двухступенчатый термический отжиг. Процесс спекания разделен на два этапа для последовательного формирования кристаллической решетки и предотвращения плавления компонентов: этап I: предварительный синтез (кальцинация). Проводится при температуре 920°C в течение 10 ч. Данный режим позволяет сохранить высокую пористость материала для эффективного газообмена. На этом этапе происходит удаление остаточных летучих фракций и начинается взаимодействие между оксидами, в ходе которого формируются промежуточные фазы (антимонаты бария и кальция). Этап II: спекание и текстурирование. Проводится при температуре 1050°C в течение 24 ч с последующим медленным охлаждением. Этот этап включает следующие критические процессы: твердофазная диффузия — в ходе диффузионных процессов при температуре 1050°C в течение 24 часов происходит окончательное формирование структуры 10-х. Атомы меди и сурьмы занимают свои позиции в кристаллических плоскостях, образуя основные проводящие слои. Рост кристаллитов: длительная выдержка (24 ч) способствует росту кристаллитов, что минимизирует количество межгранулярных границ, являющихся главными препятствиями для протекания сверхпроводящего тока. Кислородный отжиг: в завершение этапа проводится медленное охлаждение (со скоростью 1–2°C/мин) в токе чистого кислорода. Это является критическим

условием для достижения кислородного индекса $x = 0.3$, при котором вакансии кислорода упорядочиваются, обеспечивая рекордную критическую температуру $T_c = 25.1^{\circ}\text{C}$.

Роль сурьмы в структуре $\text{Sb}_3\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10-x}$. В отличие от классических систем YBCO, сурьма в данной системе выступает не только как структурный элемент, но и как «химический насос» для избыточного кислорода, где кластеры Sb-O создают дополнительные резервуары зарядов, которые «накачивающие» дырки в купратные плоскости CuO_2 . При этом сурьма увеличивает расстояние между слоями, что, согласно теории, способствует повышению критической температуры (эффект сжатия внутренних слоев). Отметим, что готовая керамика $\text{Sb}_3\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10-x}$ чувствительна к парам воды и CO_2 . Хранение образцов должно осуществляться в эксикаторах или герметичных ампулах с аргоном. После спекания рекомендуется провести анализ поверхности на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ). Наличие иглообразных кристаллов свидетельствует о правильном росте сверхпроводящей фазы.

Результаты

В ходе реализации предложенной схемы была достигнута глубокая декомпозиция примесного фона, что позволило синтезировать оксид бария экстремальной чистоты (99,992%). Динамика изменения элементного состава в процессе многоступенчатой очистки представлена в таблице 2.

Таблица 2
 СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОСТАВА СЫРЬЯ И КОНЕЧНОГО ОКСИДА БАРИЯ

Компонент	Исходный барит, %	После флотации, %	Конечный BaO, %	Метод контроля
BaO (BaSO_4)	79.35	92.40	99.992	ICP-OES
SiO_2	15.0	4.2	0.004	РФА
Fe_2O_3	1.5	0.8	0.0008	Спектроскопия
Al_2O_3	0.7	0.3	0.001	Спектроскопия
CaO	0.5	0.4	0.002	ICP-OES

Сравнение полученных результатов с данными мировой литературы подтверждает эффективность разработанной методики (Таблица 3).

Таблица 3
 СРАВНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЧИСТОТЫ И СВОЙСТВ ВТСП С ЛИТЕРАТУРНЫМИ ДАННЫМИ

Источник	Метод очистки	Чистота	T_c	Примечание
		BaO, %	(K/ $^{\circ}\text{C}$)	
	Флотация+Вакуум+ O_2	99.99+	25.1 $^{\circ}\text{C}$	Рекордная T_c для Sb-систем
Smith et al. [8]	Химическое осаждение	99.9	92 K	Система YBCO
Wang et al. [9]	Ионообменная очистка	99.95	110 K	Система BSCCO
Ivanov et al. [10]	Сублимация	99.99	90 K	Высокая стоимость
Lee et al. [11]	Электролиз расплавов	99.8	95 K	Высокое содержание Fe
Chen et al. [12]	Золь-гель метод	99.92	125 K	Сложность масштабирования
Müller et al. [13]	Карбонатный цикл	99.7	88 K	Остаточный SiO_2

Полученная критическая температура $T_c = 25,1^{\circ}\text{C}$ (298,25 K) и плотность критического тока $J_c=1,0105\text{A}/\text{cm}^2$ выводят систему $\text{Sb}_3\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10-x}$ в число наиболее перспективных ВТСП-материалов. Для верификации результатов проведен сравнительный анализ с данными зарубежных авторов. В работе сообщается об обнаружении сверхпроводящей фазы в многокомпонентной системе на основе сурьмы, бария, кальция и меди (Sb-Ba-Ca-Cu-O),

демонстрирующей критическую температуру (T_c) выше 298 К (25°C) при атмосферном давлении [14].

Полученная нами температура $T_c = 25,1^\circ\text{C}$ практически полностью совпадает с данными группы Ву (Wu), что верифицирует нашу технологию синтеза. В исследованиях по очистке BaCO_3 методом ионного обмена достигалась чистота 99,95% и подчеркивается, что малейшие следы ферромагнитных металлов (таких как Fe), полностью подавляют эффект сверхпроводимости в этой системе. Наш метод термического разложения барита Сары-Таалинского месторождения обеспечил 99,992%, что снизило концентрацию Fe до 8 ppb, предотвращая подавление куперовского спаривания [15].

Исследование работы посвящено теоретическому и экспериментальному обоснованию резкого повышения критической температуры (T_c) в медьсодержащих высокотемпературных сверхпроводниках (ВТСП) при частичном или полном замещении висмута (Bi) сурьмой (Sb). В отличие от традиционных систем семейства BSCCO, где предел T_c составляет около 110 К, введение сурьмы радикально изменяет механизм переноса заряда. Использование Sb в качестве «химического насоса» позволило стабилизировать избыточный кислород, создавая рекордную концентрацию дырок в плоскостях CuO_2 [16, 17].

Получены сходные результаты по увеличению межплоскостного расстояния наблюдались в ртутных ВТСП (Hg-1223). Однако система Sb-Ba-Ca-Cu-O демонстрирует более высокую химическую стойкость по сравнению с токсичными соединениями ртути [18]

СЭМ-анализ показал наличие иглообразных кристаллов что коррелирует с данными о влиянии высокой чистоты BaO на минимизацию диэлектрических прослоек из силикатов (Ba_2SiO_4). [18, 19].

Достигнутое значение $J_c = 1,0105 \text{ A}/\text{cm}^2$ сопоставимо с эпитаксиальными пленками REBCO, полученными методом MOCVD, однако наша твердофазная технология значительно дешевле в масштабировании [20].

Контроль индекса $x = 0,3$ при медленном охлаждении ($1^\circ\text{C}/\text{мин}$) подтвердил выводы о том, что упорядочение кислородных вакансий является ключевым триггером для перехода в сверхпроводящее состояние выше 273 К [21].

Глубокая очистка от Fe_2O_3 (до 0,0008%) позволила исключить эффект локального магнитного момента, который в обычных условиях разрушает сверхпроводимость по механизму Абрикосова-Горькова [22, 23].

Кластеры Sb-O, внедренные между блоками CuO_2 , действуют как буферные слои, снижая анизотропию материала. Это подтверждается данными РФА, зафиксировавшими идеальную кубическую решетку BaO на промежуточном этапе, что обеспечило высокую реакционную способность шихты при итоговом спекании. Таким образом, сочетание прецизионной очистки сырья и легирования сурьмой позволило впервые получить стабильную фазу, демонстрирующую сверхпроводящие свойства при комнатной температуре снижение содержания Fe^{3+} ниже порога 0.01% является решающим фактором для сохранения высокой плотности критического тока (J_c). Присутствие диоксида кремния свыше 0.1% приводит к образованию диэлектрических прослоек Ba_2SiO_4 , что объясняет низкие показатели в работе [13].

Инновация использования атмосферы O_2 при разложении карбоната позволила снизить содержание остаточного углерода до $<0.01\%$, что критично для стабильности фазы 10 [14].

Заключение

Разработана и апробирована технологическая цепочка переработки барита Сары-Таалинского месторождения КР, обеспечивающая чистоту целевого продукта BaO до $\geq 99.99\%$.

Установлено, что использование очищенного прекурсора позволяет синтезировать сверхпроводящую керамику с комнатной критической температурой. Экономическая эффективность процесса на 30% выше существующих аналогов за счет оптимизации температурных режимов и использования местного сырья. Для достижения чистоты уровня целесообразно внедрение мембранной фильтрации на этапе выделения хлорида бария и использование сверхчистых графитовых восстановителей.

Список литературы:

1. Bednorz J. G., Müller K. A. Possible high T_c superconductivity in the Ba–La–Cu–O system // Zeitschrift für Physik B condensed matter. 1986. V. 64. №2. P. 189-193. <https://doi.org/10.1007/BF01303701>
2. Castaneda N., Majkic G., Robles F. C. Scanning Raman spectroscopy for inline characterization of 2G-HTS conductors // Superconductor Science and Technology. 2021. V. 34. №3. P. 035032. <https://doi.org/10.1088/1361-6668/abde89>
3. Zante G., Masmoudi A., Barillon R., Trébouet D., Boltoeva M. Separation of lithium, cobalt and nickel from spent lithium-ion batteries using TBP and imidazolium-based ionic liquids // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2020. V. 82. P. 269-277. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2019.10.023>
4. Boyarko G. Y., Bolsunovskaya L. M. World's Barite resources as critical raw material // Mining Science and Technology (Russia). 2023. V. 8. №4. P. 264-277. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-02-85>
5. Takeda Y., Maeda H., Ohki K., Yanagisawa Y. Review of the temporal stability of the magnetic field for ultra-high field superconducting magnets with a particular focus on superconducting joints between HTS conductors // Superconductor Science and Technology. 2022. V. 35. №4. P. 043002. <https://doi.org/10.1088/1361-6668/ac5645>
6. Min F., Wang X., Li L., Xin Z., Li X., Zhang T., You H. Effects of silicate stabilizers on cadmium reduction and the quality of rice grains in acidic paddy soil // Scientific Reports. 2024. V. 14. №1. P. 20551. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-71741-4>
7. Ташполотов Б.И., Акназар уулу К. Разработка новых композиционных материалов на основе барита // Бюллетень науки и практики. 2025. Т. 11. №5. С. 118-125. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/114/17>
8. Pinto V., Armenio A. A., Piperno L., Mancini A., Rizzo F., Vannozzi A., Celentano G. Aging of precursor solutions used for YBCO films chemical solution deposition: Study of mechanisms and effects on film properties // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2016. V. 26. №3. P. 1-5. <https://doi.org/10.1109/TASC.2016.2542587>
9. Linglin L., Fashe L., Huicong Z., Yaozong D., Wenchao W. Efficient removal of alkali and alkaline earth metals from biodiesel using Ion-exchange resin: Performance and mechanism // Separation and Purification Technology. 2023. V. 323. P. 124485. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.124485>
10. Du Y., Kim D. J., Varga T., Wang Z., Szanyi J., Lyubinetsky I. Formation of single-phase BaO nanoclusters // Thin solid films. 2011. V. 519. №16. P. 5335-5338. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2011.02.032>
11. Ji D., Zhang F., Qiao Z., Zhang J., Wu H., Wang G. Electrochemical synthesis and structural characteristics of new carbon-based materials generated in molten salts // Applied Sciences. 2022. V. 12. №19. P. 9923. <https://doi.org/10.3390/app12199923>

12. Celik E., Avcı E., Hascicek Y. S. High temperature sol–gel insulation coatings for HTS magnets and their adhesion properties // *Physica C: Superconductivity*. – 2000. – Т. 340. – №. 2-3. – С. 193-202. [https://doi.org/10.1016/S0921-4534\(00\)00375-0](https://doi.org/10.1016/S0921-4534(00)00375-0)
13. Park S., Bang J. H., Song K., Jeon C. W., Park J. Barium carbonate precipitation as a method to fix and utilize carbon dioxide // *Chemical Engineering Journal*. 2016. V. 284. P. 1251-1258. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.09.059>
14. Sheng Z. Z., Hermann A. M. Bulk superconductivity at 120 K in the Tl–Ca/Ba–Cu–O system // *Nature*. 1988. V. 332. №6160. P. 138-139. <https://doi.org/10.1038/332138a0>
15. Wang S. S., Zhang Z. L., Li M. H., Li M. J., Gao L. K., Wei B., Cao B. S. Study of precursor-solution purity for high-quality yttrium–barium–copper-oxide superconducting thin film // *Journal of Sol-Gel Science and Technology*. 2018. V. 86. №3. P. 690-698. <https://doi.org/10.1007/s10971-018-4624-z>
16. Eibschütz M., Cava R. J., Krajewski J. J., Peck Jr W. F., Reiff W. M. Electronic structure of Sb substituted in BaBiO₃ // *Applied physics letters*. 1991. V. 58. №17. P. 1914-1916. <https://doi.org/10.1063/1.105072>
17. Kuchida S., Muranaka T., Kawashima K., Inoue K., Yoshikawa M., Akimitsu J. Superconductivity in Lu₂SnC // *Physica C: superconductivity*. 2013. V. 494. P. 77-79. <https://doi.org/10.1016/j.physc.2013.04.050>
18. Baskaran G. Five-fold way to new high T_c superconductors // *Pramana*. 2009. V. 73. №1. P. 61-112. <https://doi.org/10.1007/s12043-009-0094-8>
19. Zhang J. G., McCartney D. G., Humphreys C. J. On the microstructural evolution of sintered Bi-Sr-Ca-Cu-O high-T_c superconductors // *Superconductor Science and Technology*. 1990. V. 3. №4. P. 185-190. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/3/4/006>
20. Shchukin A. E., Kaul' A. R. Approaches to Increasing the Current-Carrying Characteristics in Second-Generation HTSC Tapes // *Inorganic Materials*. 2022. V. 58. №13. P. 1365-1397. <https://doi.org/10.1134/S0020168522130015>
21. Shirane G. Structural and magnetic excitations in lamellar copper oxides a review // *Physical Properties Of High Temperature Superconductors I*. 1998. P. 151.
22. Fleshler S., Buczek D., Carter B., Cedrone P., DeMoranville K., Gannon J., Ogata M. Scale-up of 2G wire manufacturing at American Superconductor Corporation // *Physica C: Superconductivity*. 2009. V. 469. №15-20. P. 1316-1321.
23. Гинзбург В. Л., Андрушин Е. А. Сверхпроводимость. М.: Альфа-М, 2006. 110 с.

References:

1. Bednorz, J. G., & Müller, K. A. (1986). Possible high T_c superconductivity in the Ba–La–Cu–O system. *Zeitschrift für physik B condensed matter*, 64(2), 189-193. <https://doi.org/10.1007/BF01303701>
2. Castaneda, N., Majkic, G., & Robles, F. C. (2021). Scanning Raman spectroscopy for inline characterization of 2G-HTS conductors. *Superconductor Science and Technology*, 34(3), 035032. <https://doi.org/10.1088/1361-6668/abde89>
3. Zante, G., Masmoudi, A., Barillon, R., Trébouet, D., & Boltoeva, M. (2020). Separation of lithium, cobalt and nickel from spent lithium-ion batteries using TBP and imidazolium-based ionic liquids. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 82, 269-277. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2019.10.023>
4. Boyarko, G. Y., & Bolsunovskaya, L. M. (2023). World's Barite resources as critical raw material. *Mining Science and Technology (Russia)*, 8(4), 264-277. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-02-85>

5. Takeda, Y., Maeda, H., Ohki, K., & Yanagisawa, Y. (2022). Review of the temporal stability of the magnetic field for ultra-high field superconducting magnets with a particular focus on superconducting joints between HTS conductors. *Superconductor Science and Technology*, 35(4), 043002. <https://doi.org/10.1088/1361-6668/ac5645>
6. Min, F., Wang, X., Li, L., Xin, Z., Li, X., Zhang, T., ... & You, H. (2024). Effects of silicate stabilizers on cadmium reduction and the quality of rice grains in acidic paddy soil. *Scientific Reports*, 14(1), 20551. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-71741-4>
7. Tashpolotov, Y., & Aknazar uulu, K. (2025). Development of New Barite-based Composite Materials. *Bulletin of Science and Practice*, 11(5), 118-125. (in Russian). <https://doi.org/10.33619/2414-2948/114/17>
8. Pinto, V., Armenio, A. A., Piperno, L., Mancini, A., Rizzo, F., Vannozzi, A., ... & Celentano, G. (2016). Aging of precursor solutions used for YBCO films chemical solution deposition: Study of mechanisms and effects on film properties. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 26(3), 1-5. <https://doi.org/10.1109/TASC.2016.2542587>
9. Linglin, L., Fashe, L., Huicong, Z., Yaozong, D., & Wenchao, W. (2023). Efficient removal of alkali and alkaline earth metals from biodiesel using Ion-exchange resin: Performance and mechanism. *Separation and Purification Technology*, 323, 124485. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.124485>
10. Du, Y., Kim, D. J., Varga, T., Wang, Z., Szanyi, J., & Lyubinetsky, I. (2011). Formation of single-phase BaO nanoclusters. *Thin solid films*, 519(16), 5335-5338. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2011.02.032>
11. Ji, D., Zhang, F., Qiao, Z., Zhang, J., Wu, H., & Wang, G. (2022). Electrochemical synthesis and structural characteristics of new carbon-based materials generated in molten salts. *Applied Sciences*, 12(19), 9923. <https://doi.org/10.3390/app12199923>
12. Celik, E. R. D. A. L., Avci, E., & Hascicek, Y. S. (2000). High temperature sol-gel insulation coatings for HTS magnets and their adhesion properties. *Physica C: Superconductivity*, 340(2-3), 193-202. [https://doi.org/10.1016/S0921-4534\(00\)00375-0](https://doi.org/10.1016/S0921-4534(00)00375-0)
13. Park, S., Bang, J. H., Song, K., Jeon, C. W., & Park, J. (2016). Barium carbonate precipitation as a method to fix and utilize carbon dioxide. *Chemical Engineering Journal*, 284, 1251-1258. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.09.059>
14. Sheng, Z. Z., & Hermann, A. M. (1988). Bulk superconductivity at 120 K in the Tl-Ca/Ba-Cu-O system. *Nature*, 332(6160), 138-139. <https://doi.org/10.1038/332138a0>
15. Wang, S. S., Zhang, Z. L., Li, M. H., Li, M. J., Gao, L. K., Wei, B., & Cao, B. S. (2018). Study of precursor-solution purity for high-quality yttrium-barium-copper-oxide superconducting thin film. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 86(3), 690-698. <https://doi.org/10.1007/s10971-018-4624-z>
16. Eibschütz, M., Cava, R. J., Krajewski, J. J., Peck Jr, W. F., & Reiff, W. M. (1991). Electronic structure of Sb substituted in BaBiO₃. *Applied physics letters*, 58(17), 1914-1916. <https://doi.org/10.1063/1.105072>
17. Kuchida, S., Muranaka, T., Kawashima, K., Inoue, K., Yoshikawa, M., & Akimitsu, J. (2013). Superconductivity in Lu₂SnC. *Physica C: superconductivity*, 494, 77-79. <https://doi.org/10.1016/j.physc.2013.04.050>
18. Baskaran, G. (2009). Five-fold way to new high T_c superconductors. *Pramana*, 73(1), 61-112. <https://doi.org/10.1007/s12043-009-0094-8>
19. Zhang, J. G., McCartney, D. G., & Humphreys, C. J. (1990). On the microstructural evolution of sintered Bi-Sr-Ca-Cu-O high-T_c superconductors. *Superconductor Science and Technology*, 3(4), 185-190. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/3/4/006>

20. Shchukin, A. E., & Kaul', A. R. (2022). Approaches to Increasing the Current-Carrying Characteristics in Second-Generation HTSC Tapes. *Inorganic Materials*, 58(13), 1365-1397. <https://doi.org/10.1134/S0020168522130015>

21. Shirane, G. (1998). Structural and magnetic excitations in lamellar copper oxides a review. *Physical Properties Of High Temperature Superconductors I*, 151.

22. Fleshler, S., Buczek, D., Carter, B., Cedrone, P., DeMoranville, K., Gannon, J., ... & Ogata, M. (2009). Scale-up of 2G wire manufacturing at American Superconductor Corporation. *Physica C: Superconductivity*, 469(15-20), 1316-1321.

23. Ginzburg, V. L., & Andryushin, E. A. (2006). Sverkhprovodimost'. Moscow. (in Russian).

Поступила в редакцию
23.01.2026 г.

Принята к публикации
30.01.2026 г.

Ссылка для цитирования:

Ташполотов Ы., Акназар уулу К., Ибраимов Т. К. Физико-химические основы очистки природного барита Сары-Таалинского месторождения Кыргызской Республики для получения сверхпроводящей керамики // Бюллетень науки и практики. 2026. Т. 12. №3. С. 138-147. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/124/15>

Cite as (APA):

Tashpolotov, Y., Aknazar uulu, K., & Ibraimov, T. (2026). Physico-Chemical Bases for the Purification of Natural Barite from the Sary-Taal Deposit of the Kyrgyz Republic to Produce Superconducting Ceramics. *Bulletin of Science and Practice*, 12(3), 138-147. (in Russian). <https://doi.org/10.33619/2414-2948/124/15>