



УДК 622.349.4

DOI 10.17073/0368-0797-2026-1-31-38



Оригинальная статья

Original article

ОСОБЕННОСТИ СОВМЕСТНОГО ИЗВЕСТКОВОГО АВТОКЛАВНОГО ОБЕСКРЕМНИВАНИЯ КВАРЦ-ТИТАНОВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ И ГИДРОТЕРМАЛЬНОГО СИНТЕЗА ГИДРОСИЛИКАТОВ КАЛЬЦИЯ*

Ю. В. Заблочкая[✉], А. С. Тужилин, Г. Б. Садыхов

Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (Россия, 119334, Москва, Ленинский пр. 49)

✉ yuliaz202123@mail.ru

Аннотация. В ИМЕТ РАН разработан автоклавный известково-щелочной способ обескремнивания титановых концентратов Пижемского и Ярегского месторождений (Средний и Южный Тиман, Республика Коми). Рудами этих месторождений являются кварц-лейкоксеновые и кварц-ильменит-лейкоксеновые песчаники. Формирование титановой составляющей данных месторождений связано с лейкоксенизацией ильменита. Геологический процесс включал удаление железа из материнских титановых минералов и заполнение образующихся пустот кварцем путем его кристаллизации из гидротермальных растворов. Это привело к ультрадисперсному размеру включений (1 – 20 мкм) SiO_2 и его структуре, характеризующейся более слабыми (ненасыщенными) связями $\text{Si}-\text{O}(\text{Si})$. В результате достигается высокая степень обескремнивания лейкоксенового и ильменитового концентратов при температуре 220 °С в автоклавных условиях за счет почти полного удаления кварца из зерен титана. Одновременно протекает гидротермальный синтез гидратов метасиликата кальция (тоберморита, ксонотлита), морфологические свойства которых зависят от условий автоклавного выщелачивания. В автоклаве в течение сравнительно короткой продолжительности процесса при соотношении $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 0,7 - 1,0$ происходит формирование кальциевого силиката с игольчатым габитусом, который образует преимущественно радиально-лучистые агрегаты. При последующем прокаливании происходит полная их дегидратация с кристаллизацией β -волластонита (CaSiO_3), приобретающего все большее практическое применение в различных областях, в том числе и наукоемких.

Ключевые слова: лейкоксен, ильменит, кварц, волластонит, известковое автоклавное обескремнивание, Ярегское месторождение, Пижемское месторождение

Благодарности: Работа выполнялась по государственному заданию № 075-00319-25-00.

Для цитирования: Заблочкая Ю.В., Тужилин А.С., Садыхов Г.Б. Особенности совместного известкового автоклавного обескремнивания кварц-титановых концентратов и гидротермального синтеза гидросиликатов кальция. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2026;69(1): 31–38. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2026-1-31-38>

* По материалам XVI Международной научной конференции «Физико-химические основы металлургических процессов» имени академика А.М. Самарина.

FEATURES OF JOINT LIME AUTOCLAVE DESILICONIZATION OF QUARTZ-TITANIUM CONCENTRATES AND HYDROTHERMAL SYNTHESIS OF CALCIUM HYDROSILICATES*

Yu. V. Zablotskaya[✉], A. S. Tuzhilin, G. B. Sadykhov

Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of the Russian Academy of Sciences (49 Leninskii Ave., Moscow 119334, Russian Federation)

✉ yuliaz202123@mail.ru

Abstract. The Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of the Russian Academy of Sciences (IMET RAS) developed an autoclave lime-alkali desiliconization method for titanium concentrates from the Pyzhemskoye and Yaregskoye deposits (Sredny and Yuzhny Timan, Komi Republic). The ores of these deposits are quartz-leucoxene and quartz-ilmenite-leucoxene sandstones. The formation of the titanium component

of these deposits is associated with the leucoxenization of ilmenite. The geological process involved the removal of iron from the parent titanium minerals and the filling of the resulting voids with quartz through its crystallization from hydrothermal solutions. This resulted in the ultra-dispersed size of inclusions (1 – 20 μm) of SiO_2 and its structure characterized by weaker (unsaturated) Si–O(Si) bonds. As a result, a high degree of desiliconization of leucoxene and ilmenite concentrates is achieved at 220 °C under autoclave conditions due to the almost complete removal of quartz from titanium grains. At the same time, hydrothermal synthesis of calcium metasilicate hydrates (tobermarite, xonotlite) takes place, the morphological properties of which depend on the conditions of autoclave leaching. In the autoclave, during a relatively short duration of the process, at a ratio of $\text{CaO/SiO}_2 = 0.7 - 1.0$, calcium silicate with a needle-like habit is obtained, which forms predominantly radially radiant sinters. Upon subsequent calcination, their complete dehydration occurs with the crystallization of β -wollastonite (CaSiO_3) increasingly gaining practical application in various fields, including science-intensive ones.

Keywords: leucoxene, ilmenite, quartz, wollastonite, lime autoclave desiliconization, Yaregskoye deposit, Pyzhemskoye deposit

Acknowledgements: The work was performed according to the state assignment No. 075-00319-25-00.

For citation: Zablotskaya Yu.V., Tuzhilin A.S., Sadykhov G.B. Features of joint lime autoclave desiliconization of quartz-titanium concentrates and hydrothermal synthesis of calcium hydrosilicates. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2026;69(1):31–38.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2026-1-31-38>

* Based on the materials of the 16th International Scientific Conference “Physicochemical Foundations of Metallurgical Processes” named after Academician A.M. Samarin.

ВВЕДЕНИЕ

В мире, в том числе и в России, титановые ресурсы относятся к стратегически важным полезным ископаемым^{1,2} [1]. В то же время они входят в группу дефицитного сырья, которая характеризуется тем, что внутреннее потребление такого минерального сырья в значительной степени обеспечивается вынужденным импортом и/или складированными запасами³ [2]. По разведанным титановым запасам РФ занимает второе место в мире. Однако действующие крупные предприятия по производству металлического титана («ВСМПО-АВИСМА», г. Березники) и пигментного диоксида титана (ООО «Русский титан», г. Армянск, Крым) вынуждены работать на импортном сырье. Данное обстоятельство не только негативно сказывается на планомерной работе и потенциале самих предприятий, но также отрицательно влияет на сырьевую и экономическую независимость страны.

Решением проблемы может стать вовлечение собственных сырьевых титановых ресурсов, в частности, использование в качестве сырья кварц-титановых песчаников Тимана (Республика Коми), которые представлены Пижемским (Средний Тиман) и Ярегским (Южный Тиман) месторождениями [3 – 7]. По данным

ГБЗ РФ за 2022 г., в балансовых запасах титана их доля составляет 50,2 % [2]. Эти месторождения располагаются друг от друга на расстоянии не более 230 км и представляют собой уникальные титановые ресурсы, особенностью которых является высокое содержание кварца как в исходной руде (до 90 %), так и в обогащенных концентратах (до 40 – 45 %) [3; 8].

Ярегское месторождение представляет собой нефтетитановые песчаники и является также коллектором высоковязкой нефти. Глубина залегания продуктивных пластов составляет 200 – 250 м, в которых содержание TiO_2 – 9 – 12 %. Основным титаносодержащим рудным минералом Ярегского песчаника является лейкоксен, представляющий собой сагенитовую структуру рутила (анатаза) с тонким срастанием с ультрадисперсным кварцем. В первой половине 60-х годов прошлого века была введена в эксплуатацию Ярегская опытно-промышленная обогатительная фабрика, в ходе работы которой получали кремнисто-титановый флотационный (лейкоксеновый) концентрат с содержанием диоксида титана 45 – 50 % и диоксида кремния 40 – 45 %. Извлечение титана при этом низкое и составляет всего 75 – 85 %. Высокое содержание кварца не позволяет использовать полученный концентрат в качестве сырья для получения пигментного TiO_2 и металлического титана. На данный момент на Ярегском месторождении ведется только добыча тяжелой нефти термошахтным способом.

Пижемские кварц-титановые песчаники имеют полиминеральный состав, где титан представлен лейкоксеном и лейкоксенизированным ильменитом [3; 4]. При этом глубина залегания песчаников на Среднем Тимане незначительна, а запасы титана превышают потенциал Ярегского месторождения. Пижемское месторождение имеет слоистое строение. Верхний слой представлен сероцветными песчаниками, характеризующимися низким содержанием сидерита и других железистых минералов. Нижний слой – это железистые

¹ Распоряжение Правительства РФ от 30 августа 2022 г. № 2473-р «Об утверждении перечня основных видов стратегического минерального сырья». URL: https://www.mnr.gov.ru/press/news/61_pozitsiya_vместo_29_pravitelstvo_rossii_utverdilo_perechen_osnovnykh_vidov_strategicheskogo_minera/ (дата обращения 28.03.2024).

² U.S. Geological Survey. Us geological survey releases 2022 list critical minerals. Available at URL: <https://www.usgs.gov/news/national-news-release/us-geological-survey-releases-2022-list-critical-minerals> (Accessed 15.04.2025).

³ Распоряжение Правительства РФ от 22 декабря 2018 г. № 2914-р «Об утверждении Стратегии развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 года». URL: <https://docs.cntd.ru/document/552051127> (дата обращения 03.04.2025).

красноцветные (сидерит-лейкоксеновые) песчаники. Содержание TiO_2 в сероцветных песчаниках колеблется в пределах 5 – 10 %, в красноцветных – 3 – 5 % [4].

Начиная с момента открытия месторождений Тимана, в СССР проводились разноплановые исследования по обогащению кварц-титановых песчаников в ведущих организациях. Однако из-за незначительной контрастности между титаносодержащими минералами, содержащими ультрадисперсные включения более легких минералов (кварц, алюмосиликаты), и кварцем сильно ограничивается применение известных физических способов для эффективного обогащения песчаников [3; 8]. В связи с этим предложенные варианты обогащения для этих месторождений не были реализованы.

Учитывая особую актуальность проблемы обеспечения страны собственной сырьевой базой для титановой промышленности, в ИМЕТ РАН с 2001 г. проводились фундаментальные исследования по обогащению кварц-титановых песчаников Тимана. Результатом стала разработка новой технологии комплексного обогащения песчаников с получением высококачественных титановых концентратов (искусственного рутила и высокотитанистого ильменита) [3; 9]. Согласно предложенной технологии, выделенные при обогащении песчаников кварц-титановые концентраты подвергаются автоклавному обескремниванию известковым молоком в присутствии небольшого количества NaOH, выступающего в качестве катализатора или активатора. При автоклавном выщелачивании одновременно происходит обескремнивание концентратов и гидротермальный синтез гидросиликата кальция (ГСК), который является промпродуктом для дальнейшего получения качественного синтетического волластонита [10; 11].

Цель данной работы – получение обобщенных результатов известкового автоклавного выщелачивания кварц-титановых концентратов месторождений Южного и Среднего Тимана при их обескремнивании с возможностью одновременного гидротермального синтеза гидрата метасиликата кальция, а также изучение особенностей формирования ГСК с игольчатым габитусом.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Руды Ярегского и Пижемского месторождений представляют собой кварц-лейкоксеновые и кварц-ильменит-лейкоксеновые песчаники. Характерным отличием пижемских песчаников от ярегских является то, что в них находится до 5 – 6 % измененного ильменита, который, в отличие от немагнитного лейкоксена, обладает слабомагнитными свойствами. При предварительной рудоподготовке и обогащении получают магнитную кварц-ильменитовую фракцию. При этом лейкоксен концентрируется в немагнитной фракции, состоящей в основном из свободного кварца. Для повышения контрастности физических свойств между ними в концентратах в ИМЕТ РАН было предложено применение магнетирующего обжига с целью восстановления связанных с TiO_2 оксидов железа (1 – 3 % Fe_2O_3) в лейкоксене до металлического состояния [9]. В результате зерна приобретают магнитные свойства, что позволяет с применением магнитной сепарации отделить лейкоксен от свободного кварца. При этом в полученном лейкоксеновом концентрате содержание кварца снижается с 80 – 90 до 25 – 30 %, а содержание TiO_2 повышается с 5 – 10 до 60 – 66 %.

Для исследований было использовано два типа концентратов месторождений Южного и Среднего Тимана – кварц-лейкоксеновый и кварц-ильменитовый, химический состав которых представлен в таблице. Как отмечено выше, для Пижемского месторождения характерно слоистое строение, в связи с чем приведены данные для сероцветных и красноцветных песчаников. Крупность исходных материалов составила – 0,315 мм.

Обескремнивание концентрата осуществляли в высокотемпературном автоклаве «Premex Reactor AG» (Швейцария). Выщелачивание проводили при температуре 220 °С в течение 2 – 3 ч под давлением насыщенных паров с использованием стехиометрического количества извести и при его недостатке ($CaO/SiO_2 = 0,7 – 1,0$), соотношение Т:Ж оставляло 1/5 – 1/7. Микроскопический анализ исходного концентрата и продуктов его обескремнивания выполнялся на оптическом микроскопе Axio Scope A1 (Carl Zeiss), а также на растровом электронном микроскопе Jeol JXA-isp100.

Химический состав кварц-титановых концентратов, %

Chemical composition of quartz-titanium concentrates, %

Основные компоненты	Ярегское месторождение	Пижемское месторождение			
		сероцветные песчаники		красноцветные песчаники	
	ЛК	ЛК	ИК	ЛК	ИК
TiO_2	63,0	66,0	53,2	61,40	53,40
SiO_2	25,0	24,9	20,2	28,23	19,12
Fe_2O_3 общ	3,5	3,8	19,3	4,57	21,53
Al_2O_3	2,5	2,8	2,4	2,73	2,73

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Обескремнивание кварц-титановых концентратов проводили известковым молоком при температуре 220 °С в автоклаве в присутствии NaOH (5 – 15 г/л). В этих условиях щелочной реагент выступает в качестве условного катализатора или активатора растворения кварца, при этом за счет двухступенчатого механизма обескремнивания осуществляется непрерывная его циркуляция в системе $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{NaOH}-\text{H}_2\text{O}$ [10 – 12]. В результате, по сравнению с известными щелочными способами, практически исключается расход дорого реагента щелочи [13 – 15]. Другим преимуществом разработанного способа является то, что в автоклавном процессе одновременно синтезируются силикатные продукты, в частности волластонит ($\beta\text{-CaSiO}_3$).

Как было отмечено выше, отличительной особенностью титановых концентратов Тимана является высокое содержание кварца. При этом в исходной

руде свободный кварц представлен в большом интервале крупности от –3,0 до +0 мм [3; 4; 8]. С помощью микроскопического анализа было исследовано распределение кварца в кварц-лейкоксеновых и кварц-ильменитовых концентратах Ярегского и Пижемского месторождений, которое представлено на рис. 1.

Как видно из рис. 1, кварц в исходных концентратах представлен в виде свободных зерен различной формы и крупности, сростков с титаносодержащими зернами (20 – 40 мкм), а также в виде ультрадисперсных включений в лейкоксене и ильмените (внутренний кварц) крупностью 1 – 20 мкм.

Процесс автоклавного выщелачивания кварц-титановых концентратов характеризуется наиболее полной степенью обескремнивания при температуре 220 °С в течение 2 – 3 ч и при мольном соотношении $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 0,7 - 1,0$. Микроскопический анализ титаносодержащих продуктов автоклавного обескремнивания показал, что в процессе выщелачивания происхо-

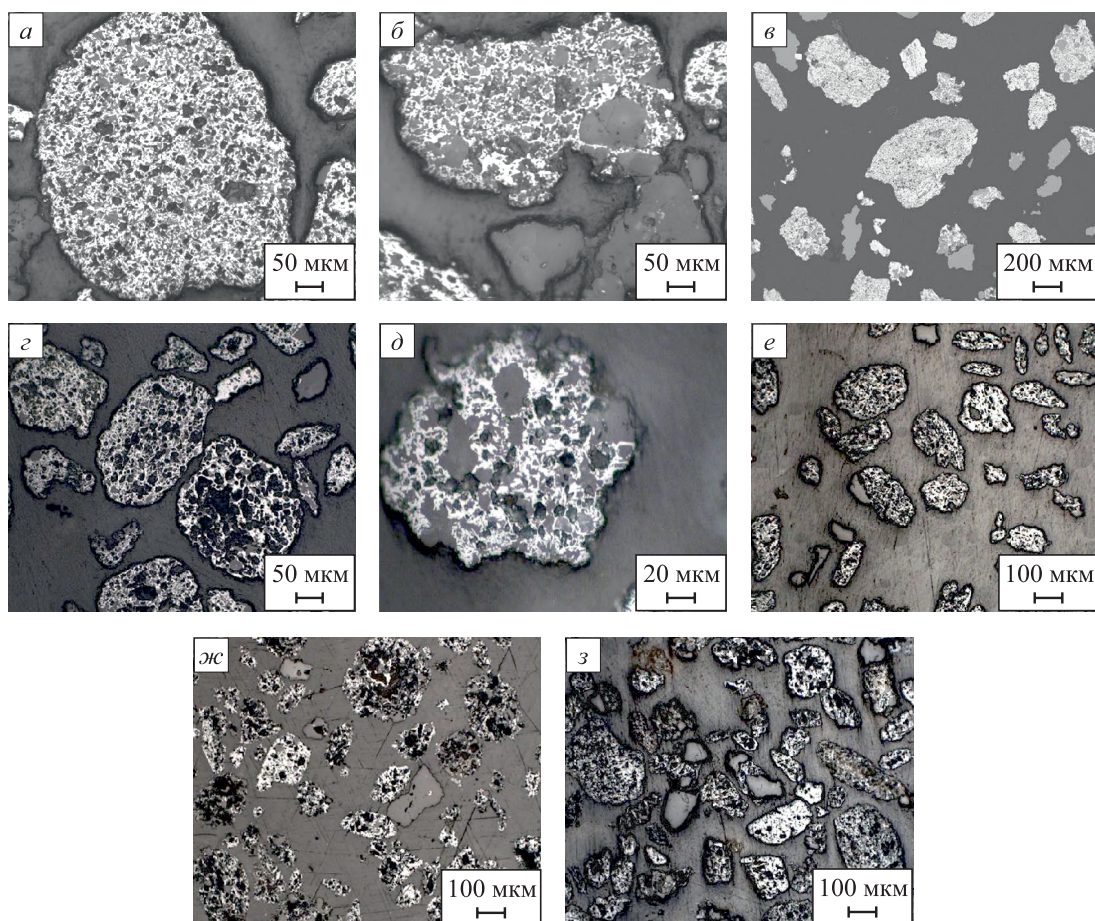


Рис. 1. Микрофотографии исходных кварц-титановых концентратов:

a – в – лейкоксен Ярегского месторождения и отдельные зерна кварца; *г, д* – лейкоксен Пижемского месторождения (сероцветные песчаники) и отдельные зерна кварца; *е* – лейкоксен Пижемского месторождения (красноцветные песчаники); *ж, з* – ильменит Пижемского месторождения, соответственно сероцветные и красноцветные песчаники

Fig. 1. Microphotographs of the initial quartz-titanium concentrates:

a – в – leucoxene of the Yaregskoye deposit and individual quartz grains; *г, д* – leucoxene of the Pyzhemskoye deposit (grey-colored sandstones) and individual quartz grains; *е* – leucoxene of the Pyzhemskoye deposit (red-colored sandstones); *ж, з* – ilmenite of the Pyzhemskoye deposit, respectively, grey-colored and red-colored sandstones

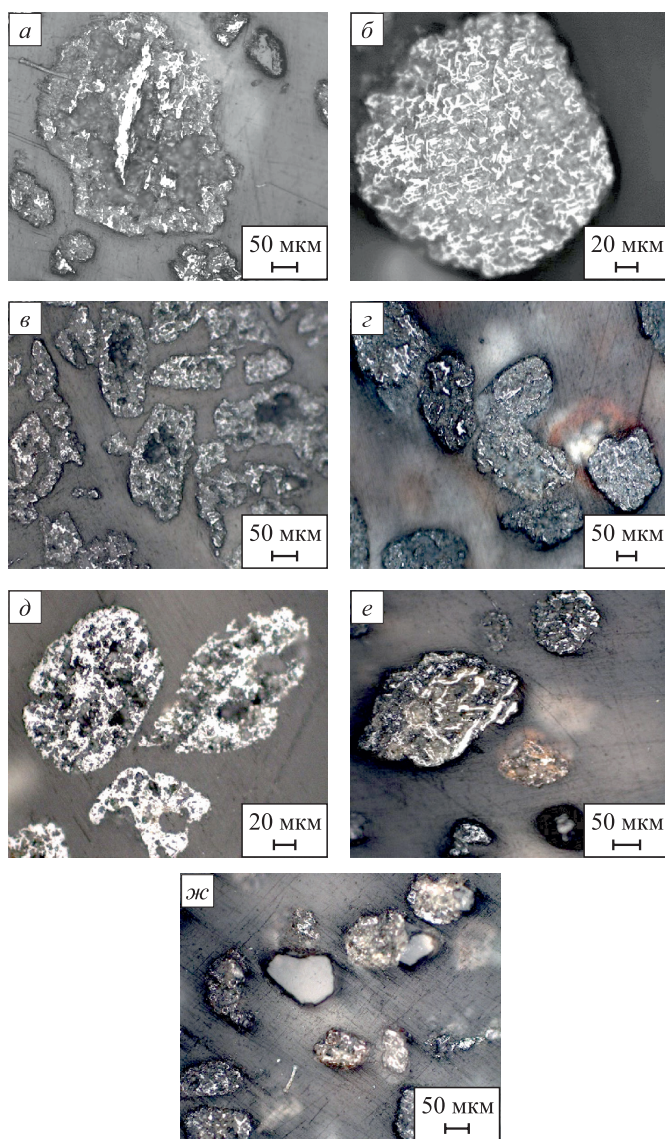


Рис. 2. Микрофотографии выщелоченных зерен лейкоксена Ярегского (а, б) и Пижемского месторождений сероцветных (в) и красноцветных (з) песчаников, зерен ильменита сероцветных (д, е) и красноцветных (жс) песчаников. Светлое – рутил (а – з), ильменит (д – жс), темное – поры

Fig. 2. Microphotographs of leached grains of leucoxene from the Yaregskoye (a, b) and Pyzhemskoye deposits of gray (v) and red-colored (z) sandstones, ilmenite grains of gray (d, e) and red-colored (жс) sandstones. Light – rutile (a – z), ilmenite (d – жс), dark – pores

дит селективное растворение внутреннего кварца, при котором зерна лейкоксена и ильменита практически полностью освобождаются от кварца (рис. 2). Высокую (более 80 %) степень растворения SiO_2 обуславливает ультрадисперсный размер включений кварца, а также генезис песчаников Тимана, связанный с процессом лейкоксензации ильменита [3; 4; 8]. В процессе формирования из материнских титановых минералов происходило удаление железа гидротермальными растворами и заполнение образующихся пустот тонкодисперсным кварцем путем кристаллизации его из гидротермаль-

ных растворов. В условиях гидротермального процесса образовался аутигенный кварц, который характеризуется развитой удельной поверхностью, а также повышенной реакционной способностью, которая вследствие описанного генезиса обуславливается более слабыми (ненасыщенными) связями $\text{Si}-\text{O}(\text{Si})$ в силоксановых мостиках оксида кремния [16].

В оптимальных условиях автоклавного выщелачивания может быть достигнута 90 – 95 % степень обескремнивания лейкоксенового концентрата, в котором остаточное содержание SiO_2 составляет 1,2 – 2,0 % (рис. 2, а – з). Выщелачивание кварц-ильменитового концентрата позволяет удалить до 80 – 87 % SiO_2 и получить высокотитанистый ильменит (до 67 % TiO_2) (рис. 2, д – жс). При этом часть остаточного SiO_2 в полученных титановых продуктах связано с нерастворившимися свободными зернами кварца (рис. 2, а, е), которые менее реакционноспособны, требуют большего времени взаимодействия и повышения концентрации щелочного реагента.

Как отмечено выше, автоклавное обескремнивание кварц-титановых концентратов сопровождается одновременным синтезом гидросиликата кальция. При проведении процесса при 220 °С и соотношении CaO/SiO_2 в пределах 0,7 – 1,0 в основном образуется ксонотлит со стехиометрической формулой $6\text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ или $\text{Ca}_6[\text{Si}_6\text{O}_{17}](\text{OH})_2$. Известно, что ксонотлит является переходным соединением от ГСК, богатого решеточно-связанной водой, к волластониту и имеет с ним общую структурную основу. Сдвоенные волластонитоподобные цепочки из кремнекислородных тетраэдров $[\text{SiO}_4]$ образуют ксонотлитовую ленту с периодом повторяемости $[\text{Si}_6\text{O}_{17}]^{10-}$ [17 – 20]. При дегидратации он переходит в структуру β-волластонита (CaSiO_3). Стоит отметить, что синтетический ксонотлит и волластонит находят широкое применение в различных отраслях промышленности (керамическая, строительная, производство красок, металлургия и др.).

С помощью растровой электронной микроскопии были проанализированы различные силикаты кальция, синтезированные при гидротермальном обескремнивании кварц-титановых концентратов (рис. 3).

Как показано на рис. 3, в зависимости от исходного сырья кристаллизуются силикаты с игольчатым габитузом, которые отличаются по соотношению длины (L) и диаметра (D) «иголок». Преимущественно получают радиально-лучистые агломераты, состоящие из отдельных кристаллов с $L/D = 10 - 20$ (рис. 3, а – в). Однако в случае образования ГСК, в которых «иголки» характеризуются соотношением $L \gg D$, агломераты представляют собой спутанно-волокнистые образования (рис. 3, д). На морфологию кристаллов может влиять как содержание кристаллизованной воды, так и образование ГСК в виде тоберморита ($5\text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ или $\text{Ca}_{10}[\text{Si}_{12}\text{O}_{31}](\text{OH})_6$), обладающего волокнистой структурой и являющегося также представителем гидратиро-

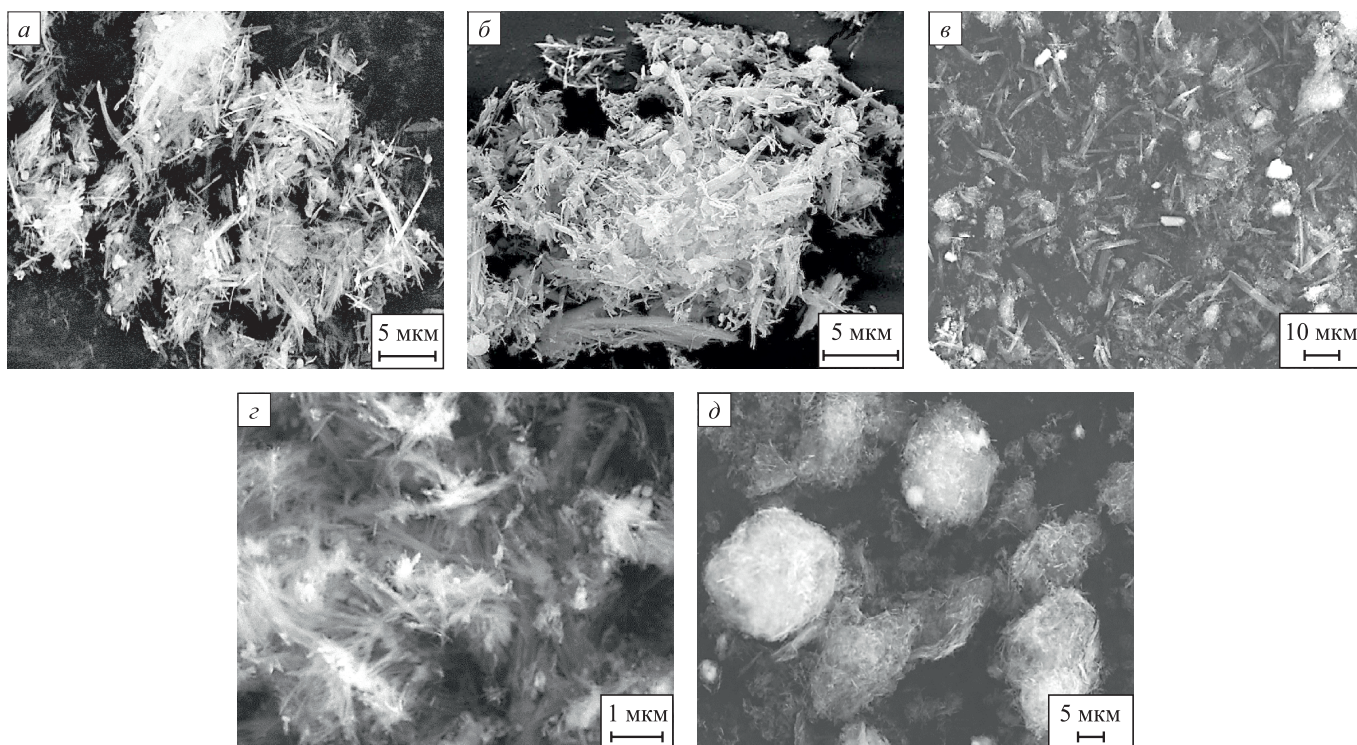


Рис. 3. Микрофотографии прокаленных гидросиликатов кальция, синтезированных при автоклавном обескремнивании лейкоксенового концентрата Ярегского (а) и Пижемского месторождений сероцветных (б) и красноцветных (в) песчаников, ильменитового концентрата сероцветных (г) и красноцветных (д) песчаников

Fig. 3. Microphotographs of calcined calcium hydrosilicates synthesized by autoclave desilicization of leucoxene concentrate from the Yaregskoye (a) and Pyzhemskoye deposits of gray (b) and red-colored (c) sandstones, ilmenite concentrate of the gray (d) and red-colored (e) sandstones

ванного волластонита. При этом тоберморит термодинамически устойчив при низких температурах и имеет тенденцию к превращению в ксонотлит при температурах 200 – 220 °С, а ксонотлит при низких температурах в присутствии воды может превращаться в тоберморит [18; 21].

Силикаты кальция со стехиометрическим составом, в частности ксонотлит ($6\text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) и волластонит (CaSiO_3), обладают рядом уникальных физико-химических свойств (высокой химической стойкостью, и как следствие, негорючестью, стабильностью диэлектрических характеристик и низкой теплопроводностью, экологической безопасностью применения и др.). Это определяет их широкий спектр применения в таких отраслях промышленности как керамическая (30 – 40 %); производство полимеров, пластмасс и резин (30 – 35 %); красок (10 – 15 %); строительная; металлургия; производство фрикционных изделий; получение фармацевтических и косметических средств [19]. Однако в настоящее время в России производство волластонита практически отсутствует и все потребности в данном сырье восполняются в основном за счет импорта.

Выявленные особенности процесса обескремнивания кварц-титановых концентратов с одновременным синтезом ГСК необходимо учитывать при разработке

технологических параметров и аппаратного оформления автоклавного выщелачивания [22].

Выводы

В работе показано, что реализация разработанного в ИМЕТ РАН совместного способа обескремнивания кварц-титановых концентратов с гидрометаллургическим синтезом гидросиликата кальция позволит осуществить комплексное освоение Пижемских и Ярегских песчаников с получением качественного искусственного рутила и высокотитанистого ильменита. При этом в среднем в 100 т концентрата содержится около 20 – 30 т ультрадисперсного кварца, который является кремнеземистым источником для попутного автоклавного синтеза ГСК. После термической обработки гидросиликатов кальция в результате дегидратации возможно получение 30 – 50 т синтетического игольчатого волластонита. Отмечено, что предложенный гидрометаллургический способ обескремнивания может быть применим для удаления SiO_2 как из кварц-лейкоксеновых, так из кварц-ильменитовых концентратов, полученных при обогащении песчаников Южного и Среднего Тимана, в том числе и для сероцветных и красноцветных слоев Пижемского месторождения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Schulz K.J., DeYoung J., Seal R., Bradley D. Critical mineral resources of the United States – Economic and environmental geology and prospects for future supply: U.S. Geological Survey Professional Paper; 2017:797.
<https://doi.org/10.3133/pp1802>
- Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2022 году. Москва: Роснедра; 2023:634.
- Садыхов Г.Б., Анисонян К.Г., Заблоцкая Ю.В., Олюнина Т.В., Копьев Д.Ю., Гончаров К.В., Балмаев Б.Г., Тужилин А.С. Фундаментальные проблемы обогащения кварц-лейкоксовых песчанников Тимана с получением качественного титанового сырья. *Титан*. 2023;(1(77)):4–20.
Sadykhov G.B., Anisonyan K.G., Zablotskaya Yu.V., Olyunina T.V., Kop'ev D.Yu., Goncharov K.V., Balmaev B.G., Tuzhilin A.S. Fundamental problems of enrichment of quartz-leucosene sandstones of Timan obtaining high-quality titanium raw materials. *Titan*. 2023;(1(77)):4–20. (In Russ.)
- Макеев А.Б., Скублов С.Г., Галанкина О.Л., Васильев Е.А., Красоткина А.О. Псевдорутил-лейкоксен-кварцевые руды Тимана – новый генетический вид титанового сырья: перспективы промышленного освоения. *Георесурсы*. 2023;25(3):163–174.
<https://doi.org/10.18599/grs.2023.3.10>
Makeev A.B., Skublov S.G., Galankina O.L., Vasil'ev E.A., Krasotkina A.O. Pseudorutile-leucosene quartz ores of Timan – a new genetic type of titanium raw materials: prospects for industrial development. *Georesourcy*. 2023;25(3):163–174. (In Russ.).
<https://doi.org/10.18599/grs.2023.3.10>
- Леонтьев Л.И. Перспективы развития титанового потенциала Ярегского месторождения. *Разведка и охрана недр*. 2021;(8):56–60.
Leontev L.I. Prospects for the development of the titanium potential of the Yareg deposit. *Prospect and protection of mineral resources*. 2021;(8):56–60. (In Russ.).
- Кузин Е.Н., Мокрушин И.Г., Кручинина Н.Е. Оценка возможности использования лейкоксен-кварцевого концентрата в качестве сырья для получения титанатов алюминия и магния. *Записки Горного института*. 2023;264:886–894. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.15>
Kuzin E.N., Mokrushin I.G., Kruchinina N.E. Assessment of the possibility of using leucosene-quartz concentrate as raw material for production of aluminium and magnesium titanates. *Journal of the Mining Institute*. 2023;264:886–894. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.15>
- Сметанников А.Ф., Оносов Д.В., Коротченкова О.В., Оносова Е.Ф. Десиликация кварц-лейкоксового концентрата из нефти и промпродуктов титановых руд. *Горный журнал*. 2023;(11):103–108.
<https://doi.org/10.17580/gzh.2023.11.18>
Smetannikov A.F., Onosov D.V., Korotchenkova O.V., Onosova E.F. Desilication of quartz-leucosene concentrate of oil and titanium ore middlings. *Gornyi Zhurnal*. 2023;(11):103–108. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17580/gzh.2023.11.18>
- Игнатьев В.Д., Бурцев И.Н. Лейкоксен Тимана. Санкт-Петербург: Наука; 1997:215.
- Пат. 2779624 RU. Способ переработки кварц-лейкоксовых концентратов с получением искусственного пористого рутила, синтетического игольчатого волластонита и прокаленного кварцевого песка / Садыхов Г.Б., Анисонян К.Г., Заблоцкая Ю.В. и др.; заявлено 23.11.2021; опубликовано 12.09.2022. Бюллетень № 2021134186.
- Заблоцкая Ю.В., Садыхов Г.Б., Гончаренко Т.В., Олюнина Т.В., Анисонян К.Г., Тагиров Р.К. Особенности процессов автоклавного выщелачивания лейкоксенового концентрата с участием $\text{Ca}(\text{OH})_2$. *Металлы*. 2011;(6):9–14.
Zablotskaya Yu.V., Sadykhov G.B., Goncharenko T.V., Olyunina T.V., Anisonyan K.G., Tagirov R.K. Features of autoclave leaching of leucosene concentrate with participation of $\text{Ca}(\text{OH})_2$. *Metally*. 2011;(6):9–14. (In Russ.).
- Zablotskaya Yu.V., Sadykhov G.B., Tuzhilin A.S., Olyunina T.V. Effects of desilication conditions on the formation of wollastonite during the autoclave leaching of silica-titanium concentrates. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2024;58(1):95–100.
<https://doi.org/10.1134/S0040579524700192>
- Baltakys K., Siauciunas R. The influence of $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ and Na_2O on the formation of calcium silicate hydrates in the CaO -quartz- H_2O system. *Mater Science – Poland*. 2007;25(1):185–198.
- Zanaveskin K.L., Maslennikov A.N., Zanaveskina S.M., Dmitriev G.S., Zanaveskin L.N., Politova E.D., Vlasenko V.I. Leaching SiO_2 and Al_2O_3 impurities from leucosene from the Yaregskoe deposit by sodium hydroxide solution. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2019;53(4):669–679. <https://doi.org/10.1134/S0040579519040110>
- Deleuze M., Goiffon A., Ibanez A., Phillipot E. Solvent influence on kinetics and dissolution mechanism of quartz in concentrated basic media (NaOH , KOH , LiOH). *Journal of Solid State Chemistry*. 1995;118(2):254–260.
<https://doi.org/10.1006/jssc.1995.1341>
- Waleed T. Rashid. Optimization alkaline leaching of silicon element from bauxite ore. *Al-Qadisiyah Journal for Engineering Sciences*. 2021;14(3):174–179.
<https://doi.org/10.30772/qjes.v14i3.890>
- Zulumyan N., Isahakyan A., Melikyan S. The influence of NaOH on the synthesis of calcium silicates. *Journal of Inorganic and Organometrical Polymers and Materials*. 2017;27:1323–1332.
<https://doi.org/10.1007/s10904-017-0586-9>
- Taylor H.F.W. Cement Chemistry. London: Thomas Telford; 1997:480.
- Black L., Garbev K., Stumm A. Structure, bonding and morphology of hydrothermally synthesised xonotlite. *Advances in Applied Ceramics*. 2009;108(3):137–144.
<https://doi.org/10.1179/174367608X353638>
- Гладун В.Д., Акатьева Л.В., Холькин А.И. Синтетические силикаты кальция. Москва: ИРИСБУК; 2011:232.
- Smalakys G., Siauciunas R. Peculiarities of xonotlite synthesis from the raw materials with different SiO_2 activities. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020;142:1671–1679. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09744-2>
- Baltakys K., Siauciunas R. Physically and chemically bound H_2O in the gyrolite structure. *Materials Science – Poland*. 2009;27(1):255–263.
- Набойченко С.С., Ни Л.П., Шнеерсон Я.М., Чугаев Л.В. Автоклавная гидрометаллургия цветных металлов. Екатеринбург: УГТУ-УПИ; 2002:940.

Сведения об авторах

Information about the Authors

Юлия Витальевна Заблоцкая, к.т.н., старший научный сотрудник, Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН

ORCID: 0000-0001-5192-3786

E-mail: yuliaz202123@mail.ru

Алексей Сергеевич Тужилин, к.т.н., Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН

ORCID: 0009-0001-5419-2189

E-mail: astuzhilin@mail.ru

Гусейн Бахлулович Садыхов, д.т.н., заведующий лабораторией проблем металлургии комплексных руд им. академика И.П. Бардина, Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН

E-mail: sadykhov@imet.ac.ru

Yuliya V. Zablotskaya, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of the Russian Academy of Sciences

ORCID: 0000-0001-5192-3786

E-mail: yuliaz202123@mail.ru

Aleksei S. Tuzhilin, Cand. Sci. (Eng.), Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of the Russian Academy of Sciences

ORCID: 0009-0001-5419-2189

E-mail: astuzhilin@mail.ru

Gusein B. Sadykhov, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Bardin Laboratory of Metallurgy of Complex Ores, Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of the Russian Academy of Sciences

E-mail: sadykhov@imet.ac.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

Ю. В. Заблоцкая – формулировка идеи работы, исследование, анализ результатов, написание текста, оформление статьи.

А. С. Тужилин – исследование, редактирование текста статьи.

Г. Б. Садыхов – научная консультация, редактирование текста статьи.

Yu. V. Zablotskaya – formulation of the article idea, research, analysis of results, writing the text, design of the article.

A. S. Tuzhilin – research, editing of the text.

G. B. Sadykhov – scientific guidance, editing of the text.

Поступила в редакцию 14.05.2025

После доработки 23.09.2025

Принята к публикации 28.11.2025

Received 14.05.2025

Revised 23.09.2025

Accepted 28.11.2025