Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2023-4-145-151 Оригинальная статья/Research article
УДК 553.578 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Получение волластонита из цеолитсодержащей породы методом твердофазного синтеза

Кирилл А. Мишагин [1] mishagin_kirill@mail.ru 0000-0002-8503-9312
Екатерина С. Ямалеева [2] curls888@yandex.ru 0000-0002-5754-205X
Елена М. Готлиб [2] egotlib@yandex.ru 0000-0003-2318-7333
Алексей И. Хацринов [2] khatsrinovai@corp.knrtu.ru 0000-0002-0623-1411

1 Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов НИЦ «Курчатовский институт», ул. Радио, 17, г. Москва, 105005, Россия
2 Казанский национальный исследовательский технологический университет, Карла Маркса, 68, г. Казань, 420015, Россия

Аннотация. Татарско-Шатрашанское цеолитсодержащее месторождение, расположенное на юго-западе Республики Татарстан, содержит большое количество кальцита (10–50%) от общей массы породы, а также других минералов – цеолита, опал-кристобаллит-тридимита. Такой состав требует дорогостоящего процесса обогащения цеолита, существенно сказывающегося на стоимости конечного продукта. В работе предлагается применение цеолитсодержащей породы для синтеза кальциевых силикатов, в частности, волластонита. В качестве Са-содержащего исходного материала в данной работе были использованы кальцит – мука известняковая (доломитовая), в качестве кремнийсодержащего материала была использована цеолитсодержащая кремнистая порода Татарско-Шатрашанского месторождения, включающая в себя также и источник кальция, в виде кальцита (до 40%). Процесс твердофазного синтеза проводился в муфельной печи SNOL 1100/7,2 при температурах 900 и 1100°С, подъем до заданной температуры осуществлялся со скоростью 5 °С/мин, выдержка составляла 3 часа. Исходные компоненты смешивали в стехиометрических соотношениях $CaO:SiO_2$=0,7-1,1. В работе применялся общепринятый метод идентификации продуктов синтеза – рентгенографический количественный анализ. Показано, что при соотношении $CaO:SiO_2$ в пределах 0,8-0,9 и изотермической выдержки в течение 3 часов при температуре 1100 °С наблюдается наибольший выход волластонита – 67–79%. Морфологию кальциевого силиката изучали методом растровой электронной микроскопии. Полученный кальциевый силикат можно охарактеризовать как спеченный продукт с малым соотношениям сторон, по своей форме, близкой к таблитчатым структурам. Волластонит такой формы может применяться в керамической промышленности, в качестве эффективной добавки, улучшающих сушильные характеристики керамических масс.

Ключевые слова: цеолит, доломит, волластонит, твердофазный синтез".

Preparation of wollastonite from zeolite-containing rock by solid-phase synthesis

Kirill A. Mishagin [1] mishagin_kirill@mail.ru 0000-0002-8503-9312
Ekaterina S. Yamaleeva [2] curls888@yandex.ru 0000-0002-5754-205X
Elena M. Gotlib [2] egotlib@yandex.ru 0000-0003-2318-7333
Alexey I. Khatsrinov [2] khatsrinovai@corp.knrtu.ru 0000-0002-0623-1411

1 All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials NRC "Kurchatov Institute", Radio str., 17, Moscow, 105005, Russia
2 Kazan National Research Technological University, Karl Marx, 68, Kazan, 420015, Russia

Abstract. The Tatarsko-Shatrashan zeolite-containing deposit, located in the southwest of the Republic of Tatarstan, contains a large amount of calcite (10-50%) of the total mass of the rock, as well as other minerals – zeolite, opal-cristoballite-tridymite. Such a composition requires an expensive zeolite enrichment process, which significantly affects the cost of the final product. The work proposes the use of zeolite-containing rock for the synthesis of calcium silicates, in particular wollastonite. Calcite – limestone flour (dolomite) was used as a Ca-containing source material in this work; zeolite-containing siliceous rock of the Tatarsko-Shatrashan deposit was used as a silicon-containing material, which also includes a source of calcium in the form of calcite (up to 40%). The solid-phase synthesis process was carried out in a SNOL 1100/7.2 muffle furnace at temperatures of 900 and 1100°C, raising to a given temperature was carried out at a rate of 5 °C/min, holding time was 3 hours. The starting components were mixed in stoichiometric ratios $CaO:SiO_2$=0.7-1.1. The work used a generally accepted method for identifying synthesis products – X-ray quantitative analysis. It has been shown that with a $CaO:SiO_2$ ratio in the range of 0.8-0.9 and isothermal exposure for 3 hours at a temperature of 1100 °C, the highest yield of wollastonite is observed – 67-79%. The morphology of calcium silicate was studied using scanning electron microscopy. The resulting calcium silicate can be characterized as a low aspect ratio sintered product with a shape similar to tabular structures. Wollastonite of this form can be used in the ceramic industry as an effective additive that improves the drying characteristics of ceramic masses.

Keywords: zeolite, dolomite, wollastonite, solid-phase synthesis.

Для цитирования
Мишагин К.А., Ямалеева Е.С., Готлиб Е.М., Хацринов А.И. Получение волластонита из цеолитсодержащей породы методом твердофазного синтеза // Вестник ВГУИТ. 2023. Т. 85. № 4. С. 145–151. doi:10.20914/2310-1202-2023-4-145-151

For citation
Mishagin K.A., Yamaleeva E.S., Gotlib E.M., Khatstinov A.I. Preparation of wollastonite from zeolite-containing rock by solid-phase synthesis. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2023. vol. 85. no. 4. pp. 145–151. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2023-4-145-151

© 2023, Мишагин К.А. и др. / Mishagin K.A. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Цеолит, обладая рядом исключительных физико-химических свойств, нашел широкое применение во многих направлениях: как минеральная добавка в вяжущих, наполнителей полимерных материалов, осушке и очистке газов в газонефтяной сфере и, конечно же, как сорбент для природных и сточных вод [1–6]. Россия обладает значительными запасами месторождений, включающих в себя цеолитсодержащие минералы, однако лишь несколько из них пригодны для промышленной добычи.

Особый интерес представляет Татарско-Шатрашанское цеолитсодержащее месторождение, расположенное на юго-западе Республики Татарстан. Большое содержание кальцита, составляющего от 10 до 50% [7] от общей массы породы, а также других минералов требуют дорогостоящего процесса обогащения цеолита, существенно сказывающегося на стоимости конечного продукта. Актуальным в этом случае является поиск альтернативного применения Татарско-Шатрашанского цеолитсодержащего месторождения. Входящие в его состав цеолит, опал-кристобаллит-тридимит позволят использовать его как фильтро-минерализацинный материал [8-10], наполнитель, добавку и как источник аморфного кремнезема [11] для синтеза кальциевых силикатов, в частности, волластонита. Кальцит в таком случае выступать в роли полезного компонента, уменьшающего количество вносимых добавок.

Работы по использованию цеолита и кремнистых пород в качестве компонентов для синтеза кальциевых силикатов ведутся давно. Так авторы, в своей работе [12] использовали цеолиты и оксид кальция для получения тоберморита методом автоклавного гидротермального синтеза. Таким же методом был получен тоберморит ($Ca_5Si_6O_{18}H_2{\cdot}4H_2O$) из карбонизированной опоки и известняка [13]. Альтернативным методом получения служит твердофазный синтез, который применяется для синтеза волластонита [14]. Сотрудникам университетов Università G. D'Annunzio (Италия) и Universitat de Barcelona (Испания), на основе диатомита и микрокальцита, удалось получить продукт с содержанием волластонита до 96% [15].

На выход волластонита, как основного продукта реакции, а также скорость силикатообразования влияют многочисленные факторы, как минералогический, гранулометрический состав смеси, мольное соотношение, химический состав, время и температура синтеза. Оптимальная температура, найденная различными авторами [16, 17], приходится на диапазон 1045–1150 °С, а время синтеза в большинстве случаев составляет от 2 до 3 часов. Такое различие обусловлено разностью исходных компонентов, его физико-химическими свойствами, т. е. факторами, изложенными нами ранее.

Вышеописанные данные позволяют высказать предположение о возможности использования труднообогатимых цеолитсодержащих пород в качестве перспективного сырья для синтеза кальциевых силикатов, в частности волластонита методом твердофазного синтеза. С учетом вышесказанного основной целью данного исследования являлась проверка возможности получения волластонита твердофазным методом с использованием Татарско-Шатрашанского месторождения цеолитсодержащей кремнистой породы.

Материалы и методы

В качестве Са-содержащего исходного материала в данной работе были использованы кальцит – мука известняковая (доломитовая) ГОСТ 14050–93.

В качестве кремнийсодержащего материала была использована цеолитсодержащая кремнистая порода Татарско-Шатрашанского месторождения, включающая в себя также и источник кальция, в виде кальцита (до 40%). Характеристики исходных материалов были проанализированы нами в предыдущих исследованиях [18].

Исходные компоненты смешивали в стехиометрических соотношениях $CaO{:}SiO_2$ = 0,7–1,1, ввиду устойчивости волластонита как продукта реакции при таких соотношениях. Полученную шихту, для эффективного смешивания и увеличения площади контакта между частицами, а также скорости реакции, подвергали совместному помолу в планетарной мельнице Fritsch Pulverisette 5/2 в течение 5 минут при 200 об/мин.

Процесс твердофазного синтеза проводился в муфельной печи SNOL 1100/7,2 при температурах 900 и 1100 °С, подъем до заданной температуры осуществлялся со скоростью 5 °С/мин, выдержка составляла 3 часа.

Исследования полученных образцов проводились в комплексной лаборатории «Наноаналитика» ФГБОУ ВО КНИТУ и включали в себя следующие методы:

Для идентификации продуктов синтеза применялся метод рентгенографического количественного анализа с использованием многофункционального дифрактометра Rigaku SmartLab со следующими параметрами съёмки: угловой интервал 2θ 3°-65°, шаг сканирования 0,02, экспозиция 1 секунда в точке.

Микрофотографии образцов с наибольшим содержанием волластонита были получены методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) на Оже-электронный спектрометр JAMP-9510F с увеличением 250X, 500X, 1000X, 2500X, 5000X.

Результаты и обсуждение

Анализ состава продуктов твердофазного синтеза методом рентгенографического количественного анализа (рисунки 1–2, таблицы 1–2) показал, что при температуре 900 °С процесс образования кальциевых силикатов (волластонита и ларнита) только начинается.

Действительно, полученные при этой температуре продукты, при всех соотношениях исходных компонентов, характеризуются большим содержанием непрореагировавшего оксида кальция и кремнезема, а содержание волластонита в них не достигает даже 50%.

На основании этого, можно сделать вывод о необходимости повышения температуры реакции, либо многократном увеличении времени изотермической выдержки. Последнее не всегда является экономически целесообразным.

Как можно заметить, при применении кальцита (таблица 1), выход волластонита больше, чем при использовании оксида кальция (таблица 2).

При использовании обоих типов кальций содержащих пород, более эффективным является соотношение исходных компонентов равным $CaO:SiO_2$ 0,8–0,9.

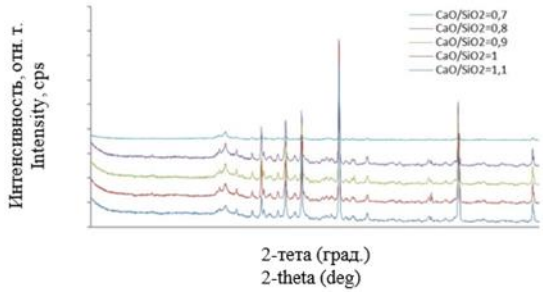


Рисунок 1. Дифрактограммы продуктов синтеза при 900 °С с применением цеолит-кремнистой породы и кальцита

Figure 1. Q-PXRD spectrum of synthesis products at 900 °C using zeolite-siliceous rock and calcite

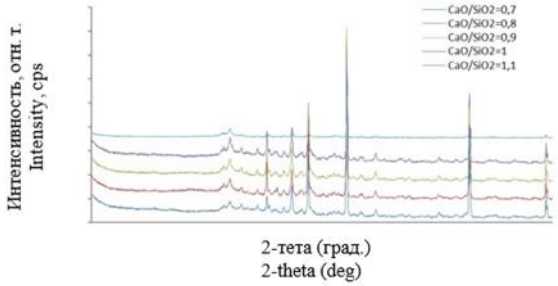


Рисунок 2. Дифрактограммы продуктов синтеза при 900 °С с применением цеолиткремнистой породы и оксида кальция

Figure 2. Q-PXRD spectrum of synthesis products at 900 °C using zeolite-silicon rock and calcium oxide

Таблица 1.

Фазовый состав продуктов синтеза при 900 °С
с применением цеолит-кремнистой породы и кальцита

Table 1.

Phase composition of synthesis products at 900 °C using zeolite-siliceous rock and calcite

$CaO: SiO_2$	Фазовый состав, % | Phase composition %					
	Волластонит | Wollastonite	Ларнит | larnite	Оксид кальция | Calcium oxide	Кварц | Quartz	Кристобалит | Cristobalite	Тридимит | Tridymite
0,7	26	2	35	11	12	15
0,8	48	4	34	8	7	-
0,9	45	2	42	8	-	2
1	35	1	49	13	-	2
1,1	31	3	48	7	-	11

Таблица 2.

Фазовый состав продуктов синтеза при 900 °С
с применением цеолит-кремнистой породы и оксида кальция

Table 2.

Phase composition of synthesis products at 900 °C using zeolite-siliceous rock and calcium oxide

$CaO: SiO_2$	Фазовый состав, % | Phase composition %					
	Волластонит | Wollastonite	Ларнит | larnite	Оксид кальция | Calcium oxide	Кварц | Quartz	Кристобалит | Cristobalite	Тридимит | Tridymite
0,7	29	1	25	19	17	8
0,8	29	5	39	10	11	6
0,9	31	11	39	9	-	10
1,0	21	15	41	13	7	1
1,1	32	5	51	7	-	5

Результаты обжига исходных смесей при более высокой температуре (1100 °С) свидетельствуют о более полном протекании процессов образования кальциевых силикатов, выход целевого продукта достигает почти 80% (рисунки 3–4, и таблицы 3–4). Наибольшее содержание волластонита в продуктах реакции обеспечивается при молярном соотношении $CaO:SiO_2$ равным 0,8–0,9. То есть, оптимальное соотношение исходных компонентов не зависит от температуры изотермической выдержки при твердофазном синтезе волластонита. Однако, состав исходной смеси (применение кальцита или оксида кальция) меньше влияет на выход волластонита при более высокой температуре синтеза.

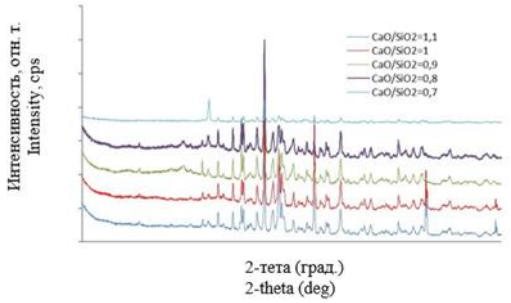


Рисунок 3. Дифрактограммы продуктов синтеза при 1100 °С с применением цеолит-кремнистой породы и кальцита

Figure 3. Q-PXRD spectrum of synthesis products at 1100 °C using zeolite-siliceous rock and calcite

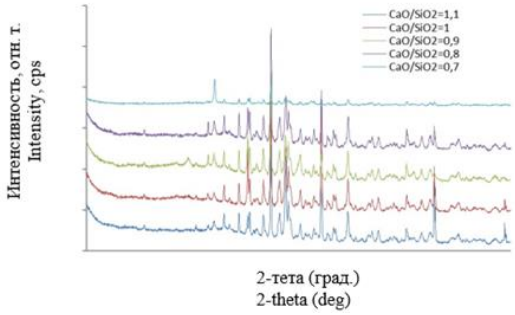


Рисунок 4. Дифрактограммы продуктов синтеза при 1100 °С с применением цеолит-кремнистой породы и оксида кальция

Figure 4. Q-PXRD spectrum of synthesis products at 1100 °C using zeolite-siliceous rock and calcium oxide

При соотношении $CaO: SiO_2 \geq 1$ достигается достаточно большое содержание целевого продукта, но в то же время наблюдается высокое содержание непрореагировавшего оксида кальция, среди всех исследованных образцов, при обоих изученных температурах синтеза.

Количество двукальциевого силиката и непрореагировавших оксидов свидетельствует о возможности поиска оптимальных параметров синтеза с увеличением температуры либо продолжительности процесса силикатообразования.

Стоит отметить, что больший выход волластонита при температуре синтеза 1100 °С имеет место при применении в качестве одного из исходных компонентов оксида кальция, а при температуре 900 °С – кальцита.

Образцы, с наибольшим выходом волластонита, полученные при соотношении $CaO:SiO_2 = 0,7$, были исследованы при помощи ОЖЭ-спектроскопии (рисунки 5–6).

Таблица 3.

Фазовый состав продуктов синтеза при 1100 °С с применением цеолит-кремнистой породы и кальцита

Table 3.

Phase composition of synthesis products at 1100 °C using zeolite-siliceous rock and calcite

$CaO: SiO_2$	Фазовый состав, % | Phase composition %					
	Волластонит | Wollastonite	Ларнит | larnite	Оксид кальция | Calcium oxide	Кварц | Quartz	Кристобалит | Cristobalite	Тридимит | Tridymite
0,7	56	10	3	4	26	1
0,8	75	15	2	5	3	-
0,9	67	22	1	5	-	-
1,0	58	26	11	5	-	-
1,1	59	16	22	3	-	-

Таблица 4.

Фазовый состав продуктов синтеза при 1100 °С с применением цеолит-кремнистой породы и оксида кальция

Table 4.

Phase composition of synthesis products at 1100 °C using zeolite-siliceous rock and calcium oxide

$CaO: SiO_2$	Фазовый состав, % | Phase composition %					
	Волластонит | Wollastonite	Ларнит | larnite	Оксид кальция | Calcium oxide	Кварц | Quartz	Кристобалит | Cristobalite	Тридимит | Tridymite
0,7	50	9	7	4	25	5
0,8	79	6	7	6	2	-
0,9	68	27	1	3	-	-
1,0	53	25	10	8	2	2
1,1	61	16	19	4	-	-

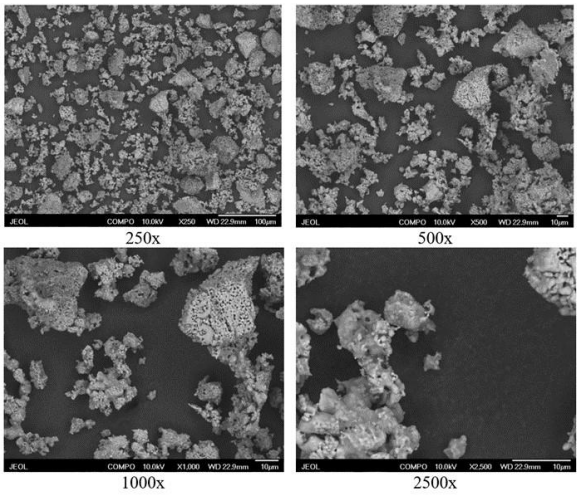


Рисунок 5. Микрофотографии продуктов синтеза при 1100 °С на основе цеолит-кремнистой породы и кальцита

Figure 5. Microphotographs of synthesis products at 1100 °C based on zeolite-siliceous rock and calcite

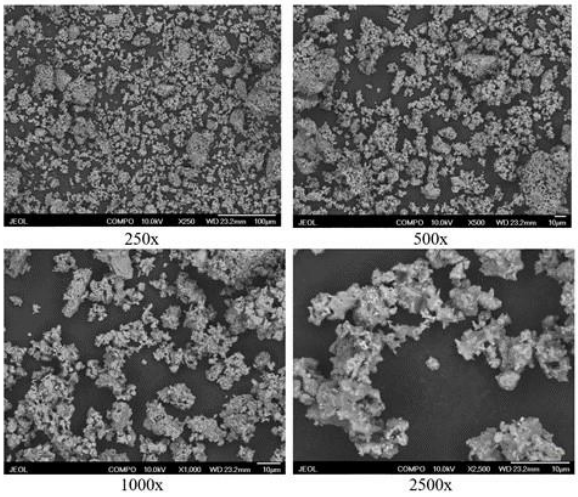


Рисунок 6. Микрофотографии продуктов синтеза при 1100 °С на основе цеолит-кремнистой породы и оксида кальция

Figure 6. Microphotographs of synthesis products at 1100 °C based on zeolite-siliceous rock and calcium oxide

Представленные фото, позволяют характеризовать морфологию кальциевого силиката, как спеченный продукт с малым соотношениям сторон, по своей форме, близкой к таблитчатым структурам. Волластонит такой формы может применяться [19, 20] в керамической промышленности, в качестве эффективной добавки, улучшающих сушильные характеристики керамических масс.

Заключение

Обобщая литературные и собственные экспериментальные данные по твердофазному синтезу $CaSiO_3$ можно сделать заключение о перспективности применения цеолит-кремнистой карбонатной породы Татарско–Шатрашанского месторождения в качестве сырья для производства кальциевых силикатов. Показано, что при соотношении CaO: SiO_2 в пределах 0,8–0,9 и изотермической выдержки в течение 3 часов при температуре 1100 °С наблюдается наибольший выход волластонита. Применение оксида кальция при вышеописанных условиях дает незначительно больший выход целевого продукта, но в то же время требует дополнительных трудозатрат, заключающихся в предварительном обжиге кальцита при темперах 900–1000 °С. Это, с технико-экономической точки зрения, по-видимому, является не целесообразным.

Литература

1 Айметдинов Р.Р., Макарова И.А., Бузаева М.В. Сорбционные методы в системах очистки природных вод // Наставничество и экология: сборник научных трудов Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых учёных, преподавателей, приуроченной к IX Ежегодному молодежному фестивалю в области устойчивого развития ВУЗЭКОФЕСТ. Ульяновск, 2023. С. 123–125.

2 Burakov A., Galunin E., Burakova I., Kucherova A. et al. Adsorption of heavy metals on conventional and nanostructured materials for wastewater treatment purposes: A review // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2018. V. 148. P. 702-712. doi: 10.1016/j.ecoenv.2017.11.034

3 Javed M., Cheng S., Zhang G., Dai P. et al. Complete encapsulation of zeolite supported Co based core with silicalite-1 shell to achieve high gasoline selectivity in Fischer-Tropsch synthesis // Fuel. 2018. V. 215. P. 226-231. doi: 10.1016/j.fuel.2017.10.042

4 Matiur R., Asif H. Green synthesis, properties, and catalytic application of zeolite (P) in production of biofuels from bagasse // International Journal of Energy Research. 2019. № 6. P. 1-8. doi: 10.1002/er.4628

5 Fanta F.T., Dubale A.A., Bebizuh D.F., Atlabachew M. Copper doped zeolite composite for antimicrobial activity and heavy metal removal from waste water // BMC Chemistry. 2019. V. 13. P. 1-12. doi: 10.1186/s13065-019-0563-1

6 Tran Y.T., Lee J., Kumar P., Kim K.-H. et al. Natural zeolite and its application in concrete composite production // Composites Part B. 2019. V. 165. P. 354-364. doi: 10.1016/j.compositesb.2018.12.084

7 Исламова Р.Р., Яковлева Г.Ю., Тюрин А.Н., Ильинская О.Н. и др. Цеолиты Татарско-Шатрашанского месторождения как носители модельного альбумина для перспективной адсорбции терапевтических белков // Записки Российского минералогического общества. 2022. № 1. С. 105–113.

8 Кулагина Е.М., Громова Е.Ю., Юсупова Р.И., Багаутдинов Ф.Ф. и др. Исследование адсорбционной способности цеолитов Татарско-Шатрашанского месторождения, применяемых в качестве гетерофункциональных сорбентов для получения органоминерального удобрения // Вестник Казанского технологического университета. 2019. № 7. С. 56–60.

9 Skleničková K., Koloušek D., Pečenka M., Vejmelková D. et al. Application of zeolite filters in fish breeding recirculation systems and their effect on nitrifying bacteria // Aquaculture. 2020. V. 516. doi: 10.1016/j.aquaculture.2019.734605

10 Irannajad M., Kamran Haghighi H. Removal of heavy metals from polluted solutions by zeolitic adsorbents: a review // Environmental Processes. 2021. V. 8. P. 7-35. doi: 10.1007/s40710-020-00476-x

11 Mishagin K., Gotlib E., Yamaleeva E., Sokolova A. et al. Comparison of the Properties of Calcium Silicates Derived from Different Raw Materials // E3S Web of Conferences. 2023. V. 410. P. 01001. doi: 10.1051/e3sconf/202341001001

12 Skawińska A., Owsiak Z. Wpływ zeolitu syntetycznego na syntezę tobermorytu Effect of synthetic zeolite on tobermorite synthesis // Cement Wapno Beton. 2022. V. 27. № 5. P. 320–329. doi: 10.32047/CWB.2022.27.5.2

13 Smalakys G., Siauciunas R. The synthesis of 1.13 nm tobermorite from carbonated opoka // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2018. V. 134. P. 493–502. doi: 10.1007/s10973–018–7418–1

14 Попов Р.Ю., Дятлова Е.М., Самсонова А.С., Шиманская А.М. Синтез волластонитсодержащей керамики на основе природного сырья республики Беларусь // Стекло и керамика. 2023. № 4. С. 12–21.

15 Novembre D., Pace C., Gimeno D. Synthesis and characterization of wollastonite-2M by using a diatomite precursor // Mineralogical Magazine. 2018. V. 82. № 1. P. 95–110. doi: 10.1180/minmag.2017.081.025

16 y González-Barros M.R., García-Ten J., Alonso-Jiménez A. Synthesis of wollastonite fromdiatomite-rich marls and itspotential ceramic uses // Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. 2023. V. 61. № 6. P.585–594. doi: 10.1016/j.bsecv.2021.05.002

17 Güler S., Yavaş A., Pulat G., Özcan Ş. et al. Green 3-step synthesis of bioactive wollastonite from industrial wastes: effects of sintering temperature, sintering time and milling time // Journal of the Australian Ceramic Society. 2023. V. 59. P. 605–620. doi: 10.1007/s41779–023–00860–4

18 Мишагин К.А., Ямалеева Е.С., Готлиб Е.М., Хацринов А.И. Изучение влияния кислотной активации на сорбционные характеристики цеолит содержащей кремнистой породы // Вестник технологического университета. 2022. Т. 25. № 6. С. 73–81.

19 Шичалин О.О., Тарабанова А.Е., Папынов Е.К., Федорец А.Н. и др. Гибридный микроволновой твердофазный синтез волластонита на основе природного возобновляемого сырья // Журнал неорганической химии. 2022. Т. 67. № 9. С. 1266–1273.

20 Muhammad A.A.H., Hasmaliza M., Zalita Z., Hamisah I. Comparative study on the physicomechanical, bioactivity, and biocompatibility properties of β-wollastonite and β-wollastonite/maghemite/strontium composites // Journal of the Australian Ceramic Society. 2023. V. 59. P. 449-458. doi: 10.1007/s41779-023-00855-1

References

1 Aymetdinov R.R., Makarova I.A., Buzaeva M.V. Sorption methods in natural water purification systems. Mentoring and ecology: collection of scientific papers of the International scientific and practical conference of students, graduate students, young scientists, teachers, dedicated to the IX Annual youth festival in the field of sustainable development VUZEKOFEST. Ulyanovsk, 2023. pp. 123–125. (in Russian).

2 Burakov A., Galunin E., Burakova I., Kucherova A. et al. Adsorption of heavy metals on conventional and nanostructured materials for wastewater treatment purposes: A review. Ecotoxicology and Environmental Safety. 2018. vol. 148. pp. 702-712. doi: 10.1016/j.ecoenv.2017.11.034

3 Javed M., Cheng S., Zhang G., Dai P. et al. Complete encapsulation of zeolite supported Co based core with silicalite-1 shell to achieve high gasoline selectivity in Fischer-Tropsch synthesis. Fuel. 2018. vol. 215. pp. 226-231. doi: 10.1016/j.fuel.2017.10.042

4 Matiur R., Asif H. Green synthesis, properties, and catalytic application of zeolite (P) in production of biofuels from bagasse. International Journal of Energy Research. 2019. no. 6. pp. 1-8. doi: 10.1002/er.4628

5 Fanta F.T., Dubale A.A., Bebizuh D.F., Atlabachew M. Copper doped zeolite composite for antimicrobial activity and heavy metal removal from waste water. BMC Chemistry. 2019. vol. 13. pp. 1-12. doi: 10.1186/s13065-019-0563-1

6 Tran Y.T., Lee J., Kumar P., Kim K.-H. et al. Natural zeolite and its application in concrete composite production. Composites Part B. 2019. vol. 165. pp. 354-364. doi: 10.1016/j.compositesb.2018.12.084

7 Islamova R.R., Yakovleva G.Yu., Tyurin A.N., Ilyinskaya O.N. et al. Zeolites of the Tatarsko-Shatrashan deposit as carriers of model albumin for promising adsorption of therapeutic proteins. Notes of the Russian Mineralogical Society. 2022. no. 1. pp. 105–113. (in Russian).

8 Kulagina E.M., Gromova E.Yu., Yusupova R.I., Bagautdinov F.F. and others. Study of the adsorption capacity of zeolites of the Tatarsko-Shatrashan deposit, used as heterofunctional sorbents for the production of organomineral fertilizers. Bulletin of the Kazan Technological University. 2019. no. 7. pp. 56–60. (in Russian).

9 Skleničková K., Koloušek D., Pečenka M., Vejmelková D. et al. Application of zeolite filters in fish breeding recirculation systems and their effect on nitrifying bacteria. Aquaculture. 2020. vol. 516. doi: 10.1016/j.aquaculture.2019.734605

10 Irannajad M., Kamran Haghighi H. Removal of heavy metals from polluted solutions by zeolitic adsorbents: a review. Environmental Processes. 2021. vol. 8. pp. 7-35. doi: 10.1007/s40710-020-00476-x

11 Mishagin K., Gotlib E., Yamaleeva E., Sokolova A. et al. Comparison of the Properties of Calcium Silicates Derived from Different Raw Materials. E3S Web of Conferences. 2023. vol. 410. pp. 01001. doi: 10.1051/e3sconf/202341001001

12 Skawińska A., Owsiak Z. Wpływ zeolitu syntetycznego na syntezę tobermorytu Effect of synthetic zeolite on tobermorite synthesis. Cement Wapno Beton. 2022. vol. 27. no. 5. pp. 320–329. doi: 10.32047/CWB.2022.27.5.2

13 Smalakys G., Siauciunas R. The synthesis of 1.13 nm tobermorite from carbonated opoka. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2018. vol. 134. pp. 493–502. doi: 10.1007/s10973–018–7418–1

14 Popov R.Yu., Dyatlova E.M., Samsonova A.S., Shimanskaya A.M. Synthesis of wollastonite-containing ceramics based on natural raw materials of the Republic of Belarus. Glass and Ceramics. 2023. no. 4. pp. 12–21. (in Russian).

15 Novembre D., Pace C., Gimeno D. Synthesis and characterization of wollastonite 2M by using a diatomite precursor. Mineralogical Magazine. 2018. vol. 82. no. 1. pp. 95–110. doi: 10.1180/minmag.2017.081.025

16 y González-Barros M.R., García-Ten J., Alonso-Jiménez A. Synthesis of wollastonite fromdiatomite-rich marls and itspotential ceramic uses. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. 2023. vol. 61. no. 6. pp. 585–594. doi: 10.1016/j.bsecv.2021.05.002

17 Güler S., Yavaş A., Pulat G., Özcan Ş. et al. Green 3 step synthesis of bioactive wollastonite from industrial wastes: effects of sintering temperature, sintering time and milling time. Journal of the Australian Ceramic Society. 2023. vol. 59. pp. 605–620. doi: 10.1007/s41779–023–00860–4

18 Mishagin K.A., Yamaleeva E.S., Gottlieb E.M., Khatsrinov A.I. Study of the influence of acid activation on the sorption characteristics of zeolite-containing siliceous rock. Bulletin of the Technological University. 2022. vol. 25. no. 6. pp. 73–81. (in Russian).

19 Shichalin O.O., Tarabanova A.E., Papynov E.K., Fedorets A.N. et al. Hybrid microwave solid-phase synthesis of wollastonite based on natural renewable raw materials. Journal of Inorganic Chemistry. 2022. vol. 67. no. 9. pp. 1266–1273. (in Russian).

20 Muhammad A.A.H., Hasmaliza M., Zalita Z., Hamisah I. Comparative study on the physicomechanical, bioactivity, and biocompatibility properties of β-wollastonite and β-wollastonite/maghemite/strontium composites. Journal of the Australian Ceramic Society. 2023. vol. 59. pp. 449-458. doi: 10.1007/s41779-023-00855-1

Сведения об авторах

Кирилл А. Мишагин инженер 1 категории, лаборатория 620, Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов НИЦ «Курчатовский институт», Радио, 17, г. Москва, 105005, Россия, mishagin_kirill@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-8503-9312

Екатерина С. Ямалеева к.т.н., доцент, кафедра медицинской инженерии, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Карла Маркса, 68 Казань, 420015, Россия, curls888@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0002-5754-205X

Елена М. Готлиб д.т.н., профессор, кафедра Технологии синтетического каучука, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Карла Маркса, 68, Казань, 420015, Россия, egotlib@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0003-2318-7333

Алексей И. Хацринов д.т.н, профессор, заведующий кафедрой, Технологии неорганических веществ и материалов, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Карла Маркса, 68, Казань, 420015, Россия, khatsrinovai@corp.knrtu.ru
https://orcid.org/0000-0002-0623-1411

Information about authors

Kirill A. Mishagin 1st category engineer, laboratory 620, All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials NRC "Kurchatov Institute", Radio str., 17 Moscow, 105005, Russia, mishagin_kirill@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-8503-9312

Ekaterina S. Yamaleeva Cand. Sci. (Engin.), associate professor, medical engineering department, Kazan National Research Technological University, Karl Marx Av., 68 Kazan, 420015, Russia, curls888@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0002-5754-205X

Elena M. Gotlib Dr. Sci. (Engin.), professor, synthetic rubber technology department, Kazan National Research Technological University, Karl Marx Av., 68 Kazan, 420015, Russia, egotlib@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0003-2318-7333

Alexey I. Khatsrinov Dr. Sci. (Engin.), head of department, technology of inorganic substances and materials department, Kazan National Research Technological University, Karl Marx Av., 68 Kazan, 420015, Russia, khatsrinovai@corp.knrtu.ru
https://orcid.org/0000-0002-0623-1411

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 12/10/2023	**После редакции** 02/11/2023	**Принята в печать** 28/11/2023
Received 12/10/2023	**Accepted in revised** 02/11/2023	**Accepted** 28/11/2023