

ХИМИЯ ТВЕРДОГО ТЕЛА/CHEMISTRY OF SOLIDS

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.159.63>

ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПЕНОЦЕОЛИТОВ НА ОСНОВЕ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ ЗАБАЙКАЛЬСКОГО КРАЯ

Научная статья

Кузнецова Н.С.^{1,*}, Батухтин А.Г.²

¹ ORCID : 0000-0003-0615-8928;

² ORCID : 0000-0002-3798-3675;

^{1, 2} Забайкальский государственный университет, Чита, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (kns2702[at]yandex.ru)

Аннотация

Проведённые испытания подтвердили возможность получения пористых материалов на основе цеолитов Шивиртуйского месторождения, соответствующих требованиям для тепло- и электроизоляционных материалов. Исследована структура межфазовых границ пеноцеолита; выявлена зависимость механических и структурных характеристик итоговых продуктов от степени дисперсности исходного материала. Исследованы структурно-химические превращения исследуемых объектов при термическом воздействии. Данные свидетельствуют, что кристаллическая структура цеолитов частично сохраняется, протекают процессыdealюминирования, дегидратации. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности исследований в данной сфере, особенно учитывая важность создания безотходных технологий, экономии ресурсов и улучшения экологической чистоты производств.

Ключевые слова: цеолит, пеноцеолит, строение, свойства, Шивиртуйское месторождение, Забайкальский край, пористость.

PRODUCTION AND RESEARCH OF THE PROPERTIES OF PENOCELITES BASED ON MINERAL RAW MATERIALS FROM THE TRANSBAIKAL REGION

Research article

Kuznetsova N.S.^{1,*}, Batukhtin A.G.²

¹ ORCID : 0000-0003-0615-8928;

² ORCID : 0000-0002-3798-3675;

^{1, 2} Transbaikal State University, Chita, Russian Federation

* Corresponding author (kns2702[at]yandex.ru)

Abstract

The tests conducted confirmed the possibility of obtaining porous materials based on zeolites from the Shiyvrtuy deposit that meet the operational standards for electrical and thermal insulation materials. The interfacial structure of foam glass and foam zeolite was analyzed, and the influence of the initial raw material's dispersion on the mechanical and structural properties of the final products was established. The structural and chemical transformations of the studied objects under thermal exposure were investigated. The data indicate that the crystalline structure of zeolites is partially preserved, and the processes of de-alumination and dehydration occur. The results obtained indicate the promising nature of research in this area, especially considering the importance of creating waste-free technologies, saving resources, and improving the environmental friendliness of production.

Keywords: zeolite, foam zeolite, structure, properties, Shiyvrtui deposit, Trans-Baikal Territory, porosity.

Введение

Тепловые сети — ключевой элемент энергетической системы, который во многих российских регионах имеет высокую степень износа вследствие воздействия механических повреждений, неблагоприятных погодных условий, гидродинамических нагрузок и прочих воздействий окружающей среды. Потери тепла достигают порядка 30%, что обусловлено в том числе недостаточной эффективностью изоляции трубопроводов [1], [2], [3].

Несмотря на разнообразие представленных на рынке теплоизолирующих материалов и технологий, задача оптимизации энергосбережения требует дальнейшего совершенствования технических характеристик существующих решений, включая повышение прочности, долговечности, снижение коэффициента теплопередачи, улучшение экономических показателей и минимизацию негативного воздействия на окружающую среду.

Материалы минерального происхождения выгодно отличаются от органических аналогов стабильностью теплотехнических параметров в течение длительного периода эксплуатации [2], [4], [5]. Среди наиболее перспективных сырьевых ресурсов выделяются цеолиты содержащие породы, а также техногенное сырье (шлаки, золы), способные к вспучиванию [3], [4], [6]. Использование такого подхода позволяет получать новые материалы для энергетики и строительства, характеризующиеся высокими показателями безопасности, энергоэффективности и экономичности.

Сегодня цеолиты активно применяются в различных сферах человеческой деятельности: как адсорбенты и катализаторы в химической промышленности, в медицинских целях, сельском хозяйстве, охране окружающей среды и иных направлениях [1], [3], [6], [7]. Их уникальные физико-химические характеристики делают цеолиты предметом повышенного научного интереса и практической значимости.

Забайкальский край обладает крупными запасами природных цеолитов объемом около одного миллиарда тонн, использование которого пока остается крайне ограниченным. Создание материалов на основе цеолитов путем целенаправленного физического, химического воздействия представляет собой хорошо изученный метод модификации природных минералов с целью достижения улучшенных физико-химических и технологически важных свойств, усиления каталитической активности и избирательности [6], [7], [8], [9].

Исследование механизмов химических реакций, происходящих при синтезе цеолитосодержащих композиций, определение оптимальных параметров и условий их изготовления для удовлетворения потребностей конкретного промышленного сектора является одной из важнейших задач современной науки и техники в области химии, энергетики, строительной отрасли.

Цель работы — получение и исследование пористых образцов на основе цеолитов Шивыртуйского месторождения в качестве электро- и теплоизоляционных материалов.

Методы и принципы исследования

Для получения шихты использовали цеолитсодержащую породу Шивыртуйского месторождения Забайкалья, в составе которой преобладают клиноптиолит, монтмориллонит, SiO_2 , CaCO_3 и др. [1], [6], [7]. В качестве флюсов добавляли соду, жидкое стекло, едкий натр. Пеноцеолиты синтезировали на основе методик [10], [11], путем термического воздействия на гомогенное сырье (рисунок 1).

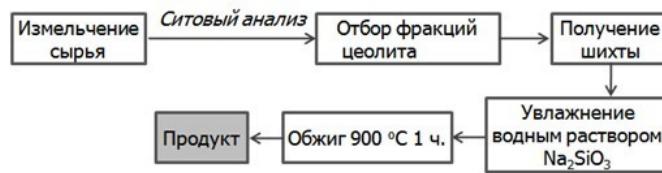


Рисунок 1 - Схема получения пеноцеолита
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.159.63.1>

Состав шихты варьировался (таблица 1) и отличался степенью дисперсности (пробы № ПЦ-1м, ПЦ-2м, ПЦ-3м — имели размер частиц цеолита до 0,5 мм, образцы № ПЦ-1к, ПЦ-2к, ПЦ-3к — с дисперсностью 0,5–1,0 мм).

Таблица 1 - Состав шихты для получения пеноцеолита

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.159.63.2>

Образцы	Состав пеноцеолита	Соотношение компонентов (масс.ч.)
1м, 1к	Цеолит : Na_2CO_3 : уголь	0,75 : 0,15 : 0,1
2м, 2к	Цеолит : Na_2SiO_3	0,90 : 0,10
3м, 3к	Цеолит : NaOH	0,75 : 0,25

В работе использован комплекс современных методов исследования: инфракрасная спектроскопия (ИК Фурье спектрометр Shimadzu FTIR-8400S, Япония), оптическая микроскопия (исследовательский стереомикроскоп MEIJITECHNO CO, LTD, Япония), титриметрический и гравиметрический анализ, **метод непосредственной оценки электрического сопротивления с помощью мегаомметра E6-32** (Россия), теплопроводности — с помощью измерителя теплопроводности МИТ-1 (Россия). Полученные результаты обрабатывали в программе Microsoft Excel 2021.

Основные результаты

Анализ поверхностей и межфазных границ позволяет получить информацию о механизмах адсорбции, диффузии, фазовом разделении и других явлениях [9], [12]. Изучение морфологии продуктов реакции помогает выявить особенности формирования их внутренней структуры. Оптические изображения образцов пеноцеолитов представлены на рисунке 2.

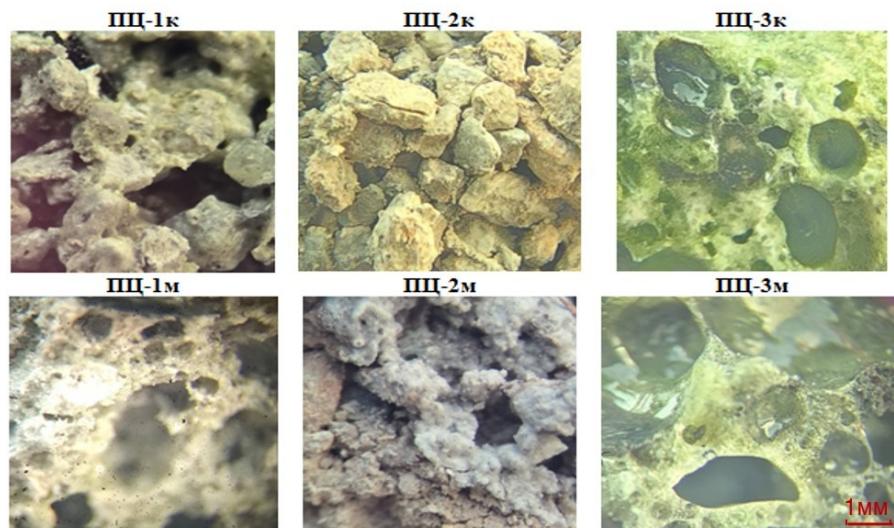


Рисунок 2 - Оптические изображения полученных образцов ПЦ
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.159.63.3>

Фотографии на рисунке 2 демонстрируют влияние размера частиц исходного сырья на вспениваемость продукта. Макро- и микроструктура образцов пеноцеолита зависит от степени дисперсности нативного сырья, особенно в пробах ПЦ-1к, ПЦ-2к, где наблюдаются непроплавленные частицы и крупнозернистость, пробе ПЦ-3к это не характерно. Кроме того, в последнем случае поры имели более четкую структуру и отличались высокой прочностью, стеклообразностью. Известно, что при нагревании цеолитов выше 700 °C начинается процесс оплавления частиц, при этом давление и концентрация газообразователя достигают минимального уровня преодоления сил поверхностного натяжения, что ведет к росту радиуса пор [12], [13].

На рисунке 3 приведены ИК-спектры исходного цеолита и одного из образцов пеноцеолита (спектры всех полученных проб имели сходную картину). В ИК-спектрах образцов пеноцеолитов присутствуют полосы поглощения, характерные для алюмосиликатов (рисунок 3): 3636–3455 cm^{-1} — силанольные группы, 2800–3000 cm^{-1} , соответствующие колебательным движениям ОН-групп; 1250–800 cm^{-1} , 780–760 cm^{-1} соответствующие структуре $[\text{SiO}_4]$, 1030–1100 cm^{-1} — валентные колебания O-Si, полосы поглощения 695, 540 и 470 cm^{-1} — деформационные колебания кремний-кислородных связей [14]. Различия, выявляемые на инфракрасных спектрах, объясняются химическим взаимодействием между компонентами, приводящим к преобразованию диоксида кремния (SiO_2) из кристаллического состояния в аморфное.

Спектры пеноцеолитов отличаются слаживанием и расширением указанных линий, исчезновением двойного максимума. Подобная тенденция отмечается и для специфичных полос карбоната (валентные колебания CO_3^{2-} в области 1468–1395 cm^{-1}) и силанольных групп (полосы 3636–3455 cm^{-1}) [12], [14].

Присутствие добавок отражается появлением пика 1440 cm^{-1} — маркера CO_3^{2-} . Карбонаты усиливают полимеризацию силикатного каркаса, что подтверждает изменение полосы в районе 1100 cm^{-1} [7], [14], играют значительную роль в формировании пористой структуры, поскольку при высокой температуре гранулы начинают спекаться, а выделяющийся при разложении карбоната углекислый газ увеличивает размеры пор. Известно, что при нагревании свыше 700°C легкоплавких эвтектик в системе $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$, оксид натрия переходит в жидкую фазу, а освобожденный CO_2 накапливается внутри закрытых пор [6], [14].

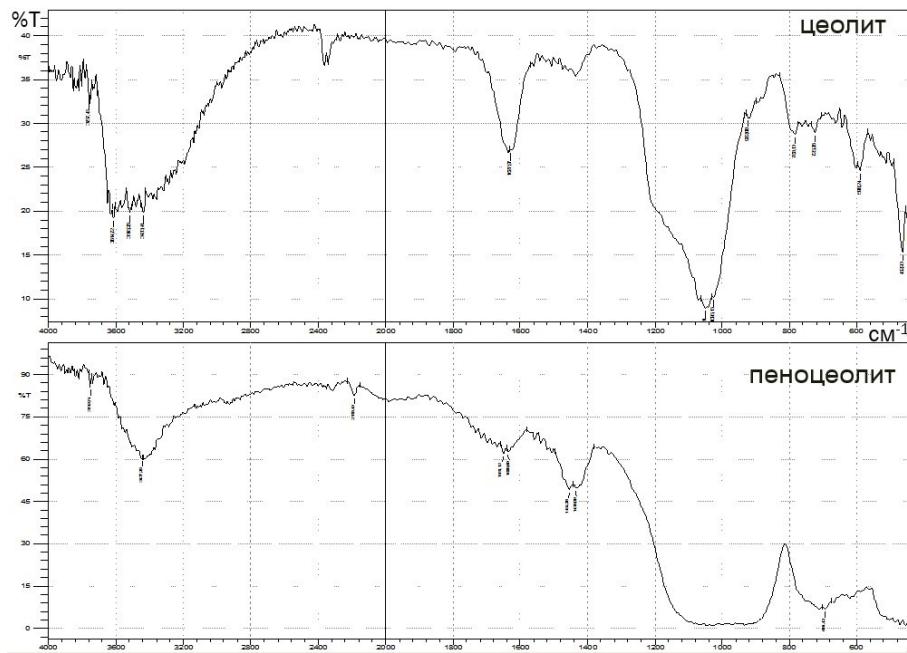


Рисунок 3 - ИК-спектры образцов нативного цеолита и пеноцеолита (ПЦ-Зм)
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.159.63.4>

При получении материалов на основе силикатов происходит распад силоксановых групп ($\equiv Si - O - Si \equiv$), с образованием силанолятов в щелочной среде ($\equiv Si-O-Me$, где Me — щелочной металл) [12], [14], [15]. Присутствие монтмориллонита ($Al_2O_3 \cdot 3/5SiO_2 \cdot nH_2O$) в Шивыртуйских цеолитах обуславливает сохранение полос поглощения, характерных для воды и свободных гидроксильных групп ($1650-1680\text{ cm}^{-1}$) в спектрах пеноцеолитов.

Как видно из представленных в таблице 2 данных, все образцы пеноцеолита имеют низкую теплопроводность, близкую к органическим традиционным теплоизолирующими веществам (пенополиуретан, пеноплекс, значение которых около $0,04\text{ Вт}/(м^*К)$). Наибольшее электрическое сопротивление продемонстрировала проба ПЦ-Зк, наименьшее — ПЦ-1м. Все синтезированные материалы характеризуются более низкими значениями теплопроводности, чем нативный цеолит, особенно образцы ПЦ-1м и ПЦ-1к (на 24 % ниже природного минерала).

По электрическому сопротивлению синтезированные композиции также превосходили исходный цеолит. Так, показатели сопротивления превышают (в среднем) в 1,7 раза (№ 1), в 7,3 раза (№ 2), 22,3 раза (№ 3). Данное явление связано с присутствием в составе композитов оксидов кремния, алюминия и других минералов с низкой электропроводностью, дегидратацией образцов, что сопровождается усилением связи между катионами проводимости и решеткой алюмосиликатов, затрудняет перемещение, снижая проводимость [16], [17].

Таблица 2 - Значения коэффициента теплопроводности, сопротивления, электрической проводимости образцов пеноцеолита

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.159.63.5>

Пара метры	Образцы ПЦ						
	цеоли т	1м	1к	2м	2к	3м	3к
Тепло проводно сть λ , Вт/(м*К) эксперим ент	0,063 2	0,047 8	0,048 0	0,051 2	0,055 7	0,054 8	0,050 3
Сопр отивлени е (R, ГОм)	26,5	33,9	55,9	211,1	173,2	450,0	731,4
Пров одимость (G, См) $*10^{-10}$	0,377	0,295	0,179	0,048	0,058	0,022	0,014

Таким образом, полученные образцы на основе природных алюмосиликатных минералов Забайкальского края могут стать перспективными электро- и теплоизоляционными материалами.

Заключение

Анализ литературы выявил ключевую проблему производства минеральных теплоизоляционных материалов — невозможность целенаправленно контролировать качество конечного продукта. Для устранения этого недостатка, необходимо разработать научно обоснованные методы регулирования технологических процессов. Определение оптимальных параметров термической обработки сырья — сложная задача, в которой неизученным остается влияние динамических изменений температурного поля и размера пор, а также химические реакции, протекающие в исходной смеси компонентов для изготовления пористых композиций.

Теплоизоляционные материалы необходимы для надежной и эффективной защиты промышленной аппаратуры, трубопроводных сетей, строений и конструкций, гарантируя их бесперебойную работу. Разработка и последующее внедрение новых теплоизоляционных материалов, таких как пеностекло, пеноцеолиты, способны стать эффективным инструментом повышения энергетической эффективности в отраслях теплоэнергетики и сопряженных областях [1], [2], [7]. Важным аспектом является создание технологий производства материалов нового поколения, отличающихся качеством и долговечностью, позволяющих вовлекать местные ресурсы минерального сырья и промышленные отходы (угольную золу, шлаки, отвалы, хвосты) для минимизации отрицательного воздействия на окружающую среду и повышения экономической отдачи добычи полезных ископаемых [3], [6].

Экспериментально показана возможность создания электро- и теплоизоляционных материалов на основе цеолитсодержащих пород Шивыртуйского месторождения и минеральных флюсов. Синтезированные материалы отвечают основным требованиям, предъявляемым к теплоизоляционным материалам (пористость, достаточная механическая прочность, пожаробезопасность, стойкость к воздействию высоких температур, влаги, нефтепродуктов, электричества).

Результаты убедительно показывают перспективность дальнейших исследований в данном направлении, в особенности с точки зрения важности создания безотходных технологий, бережливого расходования ресурсов и повышения экологичности производственного цикла.

Финансирование

Работа выполнена в рамках Госзадания № 123102000012-2 «Комплексное исследование аэродинамических характеристик плазменных систем термохимической подготовки топлива».

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Фазылзянов Р.Р., Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики», Казань Российская Федерация

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.159.63.6>

Funding

The work was performed within the state assignment No. 123102000012-2 «Comprehensive study of the aerodynamic characteristics of plasma thermochemical fuel preparation systems».

Conflict of Interest

None declared.

Review

Fazilzyanov R.R., Scientific and Production Association «State Institute of Applied Optics», Kazan Russian Federation
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.159.63.6>

Список литературы / References

1. Батухтин А.Г. Применение цеолитсодержащих пород Восточного Забайкалья для снижения антропогенного воздействия ТЭС на окружающую среду : монография / А.Г. Батухтин, М.С. Басс, Ю.В. Дорфман [и др.]. — Чита : ЧитГУ, 2011. — 160 с.
2. Goltsman B.M. Production of foam glass materials from silicate raw materials by hydrate mechanism / B.M. Goltsman, L.A. Yatsenko, N.S. Goltsman // Solid State Phenomena. — 2020. — Vol. 299. — P. 293–298. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.299.293.
3. Иванов К.С. Применение цеолитов Якутии для получения гранулированного теплоизоляционного материала / К.С. Иванов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2021. — Т. 332, № 8. — С. 160–167. DOI: 10.18799/24131830/2021/8/3314.
4. Ivanov K.S. Preparation and properties of foam glass-ceramic from diatomite / K.S. Ivanov // Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition. — 2018. — Vol. 33, Iss. 2. — P. 273–277. DOI: 10.1007/s11595-018-1817-8.
5. Коновалова Н.А. Исследование интенсивности порообразования составов пеностекла на основе цеолитсодержащих пород Забайкальского края / Н.А. Коновалова, Е.В. Непомнящих // Фундаментальные исследования. — 2017. — № 10. — С. 19–23.
6. Накамото К. ИК спектры и спектры КР неорганических и координационных соединений / К. Накамото; пер. с англ. Л.В. Христенко; под ред. Ю.А. Пентина. — Москва : Мир, 1991. — 536 с. — ISBN 5-03-001749-6.
7. Патент № 2726091 Российской Федерации, МПК C03C 11/00. Шихта для экологически безопасного производства пеностекла: № 2019123908 : заявл. 23.07.2019; опубл. 09.07.2020 / Н.А. Коновалова [и др.]. — Бюл. № 19. — 5 с.
8. Патент № 2272007 РФ, МПК C03C 11/00. Шихта для производства пеноцеолита: № 2004127318/03 : заявл. 13.09.2004; опубл. 20.03.2006 / В.И. Верещагин, С.Н. Соколова, Л.К. Казанцева. — Бюл. № 8. — 5 с.

9. Размахнин К.К. Повышение качества цеолитсодержащих пород Восточного Забайкалья на основе применения направленных энергетических воздействий / К.К. Размахнин, А.Н. Хатькова, Л.В. Шумилова // Записки Горного института. — 2024. — Т. 265. — С. 129–139. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_101_0_361.
10. Эргашев М.М. Современные теплоизоляционные материалы в строительстве / М.М. Эргашев, Х.Т. Жамолиддинова // Экономика и социум. — 2023. — № 4-1(107). — С. 1058–1061.
11. Зонхоеva Э.Л. Природные цеолиты Забайкалья: свойства и применение / Э.Л. Зонхоева; отв. ред. А.М. Плюснин. — Улан-Удэ : БНЦ СО РАН, 2018. — 192 с.
12. Da Silva R.C. Foam glass using sodium hydroxide as foaming agent: study on the reaction mechanism in soda-lime glass matrix / R.C. Da Silva, E.T. Kub Ski, E.T. Tenório-Neto [et al.] // Journal of Non-Crystalline Solids. — 2019. — Vol. 511. — P. 177–182. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2019.02.003.
13. Eldin J. Innovative glass-ceramic foams prepared by alkali activation and reactive sintering of zeolite-poor rock and sawdust for thermal insulation / J. Eldin, F.M. Ibrahim, M. Tihtih [et al.] // Journal of Building Engineering. — 2022. — № 59. — P. 1–18. DOI: 10.1016/j.jobe.2022.105160.
14. Eldin J. Preparation, characterization, and physicomechanical properties of glass-ceramic foams based on alkali-activation and sintering of zeolite-poor rock and eggshell / J. Eldin, F.M. Ibrahim, L.A. Gomze [et al.] // Ceramics International. — 2022. — № 48. — P. 25905–25917. DOI: 10.1016/j.ceramint.2022.05.267.
15. Ibrahim J.E.F.M. Ceramic bricks with enhanced thermal insulation produced from natural zeolite / J.E.F.M. Ibrahim, E. Kurovics, M. Tihtih, L.A. Görmze // Pollack Periodica. — 2021. — Vol. 16, № 3. — P. 101–107. DOI: 10.1556/606.2021.00341.
16. Ibrahim J.E.F.M. Preparation of innovative eco-efficient composite bricks based on zeolite-poor rock and Hen's eggshell / J.E.F.M. Ibrahim, O.B. Kotova, S. Sun [et al.] // Journal of Building Engineering. — 2022. — Vol. 45. — P. 103491. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.103491.
17. Peculiarities of foam glass synthesis from natural silica-containing raw materials / E.A. Yatsenko, B.M. Goltsman, L.V. Klimova [et al.] // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. — 2020. — Vol. 142. — P. 119–127. DOI: 10.1007/s10973-020-10015-3.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Batukhtin A.G. Primenenie tseolitsoderzhashchikh porod Vostochnogo Zabaikal'ya dlya snizheniya antropogenного vozdeystviya TES na okruzhayushchuyu sredu [The use of zeolite-containing rocks of Eastern Transbaikalia to reduce the anthropogenic impact of thermal power plants on the environment] : monograph / A.G. Batukhtin, M.S. Bass, Yu.V. Dorfman [et al.]. — Chita : ChitSU, 2011. — 160 p. [in Russian]
2. Goltsman B.M. Production of foam glass materials from silicate raw materials by hydrate mechanism / B.M. Goltsman, L.A. Yatsenko, N.S. Goltsman // Solid State Phenomena. — 2020. — Vol. 299. — P. 293–298. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.299.293.
3. Ivanov K.S. Primenenie tseolitov Yakuti dlya polucheniya granulirovannogo teploizolyatsionnogo materiala [The use of Yakutia zeolites for the production of granular thermal insulation material] / K.S. Ivanov // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov [Proceedings of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering]. — 2021. — Vol. 332, № 8. — P. 160–167. DOI: 10.18799/24131830/2021/8/3314. [in Russian]
4. Ivanov K.S. Preparation and properties of foam glass-ceramic from diatomite / K.S. Ivanov // Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition. — 2018. — Vol. 33, Iss. 2. — P. 273–277. DOI: 10.1007/s11595-018-1817-8.
5. Konovalova N.A. Issledovanie intensivnosti poroobrazovaniya sostavov penostekla na osnove tseolitsoderzhashchikh porod Zabaikal'skogo kraja [Study of the pore formation intensity of foam glass compositions based on zeolite-containing rocks of the Trans-Baikal Territory] / N.A. Konovalova, E.V. Nepomnyashchikh // Fundamental'nye issledovaniya [Fundamental Research]. — 2017. — № 10. — P. 19–23. [in Russian]
6. Nakamoto K. IK spektry i spektry KR neorganicheskikh i koordinatsionnykh soedineniy [Infrared and Raman Spectra of Inorganic and Coordination Compounds] / K. Nakamoto; transl. from English by L.V. Khristenko; ed. by Yu.A. Pentin. — Moscow : Mir, 1991. — 536 p. — ISBN 5-03-001749-6. [in Russian]
7. Patent № 2726091 Rossiyanskaya Federatsiya, MPK S03S 11/00. Shikhta dlya ekologicheski bezopasnogo proizvodstva penostekla [Charge for environmentally friendly production of foam glass]: № 2019123908 : filed 23.07.2019; publ. 09.07.2020 / N.A. Konovalova [et al.]. — Bull. № 19. — 5 p. [in Russian]
8. Patent № 2272007 RF, MPK S03S 11/00. Shikhta dlya proizvodstva penotseolita [Charge for the production of foam zeolite] : № 2004127318/03: filed 13.09.2004; publ. 20.03.2006 / V.I. Vereshchagin, S.N. Sokolova, L.K. Kazantseva. — Bull. № 8. — 5 p. [in Russian]
9. Razmakhnin K.K. Povyshenie kachestva tseolitsoderzhashchikh porod Vostochnogo Zabaikal'ya na osnove primeneniya napravlennykh energeticheskikh vozdeystviy [Improving the quality of zeolite-containing rocks of Eastern Transbaikalia based on the use of directed energy impacts] / K.K. Razmakhnin, A.N. Khat'kova, L.V. Shumilova // Zapiski Gornogo instituta [Journal of Mining Institute]. — 2024. — Vol. 265. — P. 129–139. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_101_0_361. [in Russian]
10. Ergashev M.M. Sovremennye teploizolyatsionnye materialy v stroitel'stve [Modern thermal insulation materials in construction] / M.M. Ergashev, Kh.T. Zhamoliddinova // Ekonomika i sotsium [Economy and Society]. — 2023. — № 4-1(107). — P. 1058–1061. [in Russian]
11. Zonkhoeva E.L. Prirodnye tseolity Zabaikal'ya: svoystva i primenenie [Natural zeolites of Transbaikalia: properties and applications] / E.L. Zonkhoeva; ed. by A.M. Plyusnin. — Ulan-Ude : BNTs SB RAS, 2018. — 192 p. [in Russian]
12. Da Silva R.C. Foam glass using sodium hydroxide as foaming agent: study on the reaction mechanism in soda-lime glass matrix / R.C. Da Silva, E.T. Kub Ski, E.T. Tenório-Neto [et al.] // Journal of Non-Crystalline Solids. — 2019. — Vol. 511. — P. 177–182. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2019.02.003.

13. Eldin J. Innovative glass-ceramic foams prepared by alkali activation and reactive sintering of zeolite-poor rock and sawdust for thermal insulation / J. Eldin, F.M. Ibrahim, M. Tihtih [et al.] // Journal of Building Engineering. — 2022. — № 59. — P. 1–18. DOI: 10.1016/j.jobe.2022.105160.
14. Eldin J. Preparation, characterization, and physicomechanical properties of glass-ceramic foams based on alkali-activation and sintering of zeolite-poor rock and eggshell / J. Eldin, F.M. Ibrahim, L.A. Gomze [et al.] // Ceramics International. — 2022. — № 48. — P. 25905–25917. DOI: 10.1016/j.ceramint.2022.05.267.
15. Ibrahim J.E.F.M. Ceramic bricks with enhanced thermal insulation produced from natural zeolite / J.E.F.M. Ibrahim, E. Kurovics, M. Tihtih, L.A. Gömze // Pollack Periodica. — 2021. — Vol. 16, № 3. — P. 101–107. DOI: 10.1556/606.2021.00341.
16. Ibrahim J.E.F.M. Preparation of innovative eco-efficient composite bricks based on zeolite-poor rock and Hen's eggshell / J.E.F.M. Ibrahim, O.B. Kotova, S. Sun [et al.] // Journal of Building Engineering. — 2022. — Vol. 45. — P. 103491. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.103491.
17. Peculiarities of foam glass synthesis from natural silica-containing raw materials / E.A. Yatsenko, B.M. Goltsman, L.V. Klimova [et al.] // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. — 2020. — Vol. 142. — P. 119–127. DOI: 10.1007/s10973-020-10015-3.