

# Минерально-сырьевая база цеолитов России

П.Е. Белоусов<sup>1\*</sup>, П.Э. Кайлачаков<sup>1,2</sup>, А.О. Румянцева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

Рассмотрены основные месторождения цеолитов стран СНГ и России, выделены крупные цеолитовые провинции и определены наиболее перспективные территории для расширения минерально-сырьевой базы. Приведены сведения по запасам месторождений, степени их освоения и объемам добычи. Установлено влияние условий образования, а также состава и типа исходного материнского материала на текстурно-структурные особенности цеолитов. На примере месторождений цеолита осадочного, вулканогенно-осадочного и гидротермального типов рассмотрены особенности их геологического строения и состава. Дан сравнительный анализ цеолитов наиболее промышленно важных месторождений, охарактеризованы их минеральный и химический составы, емкость катионного обмена, величина удельной поверхности и термические свойства. Данная работа является результатом собственных геологических исследований авторов на различных месторождениях цеолитов России и стран СНГ, а также обобщения ранее опубликованных материалов.

**Ключевые слова:** цеолит, клиноптилолит, промышленное сырье, сорбенты, минерально-сырьевая база

**Для цитирования:** Белоусов П.Е., Кайлачаков П.Э., Румянцева А.О. (2024). Минерально-сырьевая база цеолитов России. *Георесурсы*, 26(4), с. 260–274. <https://doi.org/10.18599/grs.2024.4.12>

## Введение

Цеолитовые породы представляют собой важный объект исследования как с научной, так и с прикладной стороны. В переводе с греческого цеолиты означают «кипящую» воду, что связано с их свойством активно впитывать воду с характерным шипением. Имея вулканическую природу, они образуются аналогично бентонитовым глинам – по магматическим породам под действием слабощелочных растворов.

С минералогической точки зрения, цеолиты представляют собой целую группу, состоящую из более чем 200 минералов, отличающихся друг от друга, в первую очередь, соотношением алюминия к кремнию, размером входных окон и формой кристаллов (Дистанов и др., 2000). Наиболее распространенными минералами группы цеолита являются клиноптилолит, морденит, гейландит, стильбит и шабазит, встречающиеся на большинстве российских месторождений.

В отличие от глинистых минералов, имеющих слоистую структуру, способную к набуханию, цеолиты имеют жесткий кристаллический каркас. Дефекты в кристаллической решетке, образовавшиеся за счет изоморфных изменений в структуре цеолитов, приводят к появлению отрицательного заряда в так называемых

каналах – шестигранных наноразмерных полостях, пронизывающих все тело минерала. Именно эта особенность позволяет использовать цеолиты в качестве молекулярного сита – то есть пропускать определенные молекулы и ионы небольшого размера сквозь структуру минерала и задерживать крупные молекулы (Коссовская, 1980; Дистанов и др., 2000). На этом принципе основана система очистки газов и производство катализаторов. Помимо нефтегазового сектора цеолиты широко применяют в сельском хозяйстве, животноводстве и т.д. (Kordala, Wyszowski, 2024; Ming, Boettinger, 2001). Обладая мощными ионно-обменными свойствами цеолитовые фильтры способны быстро и эффективно очищать загрязненные воды (Буров и др., 1990; Милютин и др., 2023; Gadore et al., 2024).

Основной целью настоящей работы являлось проведение анализа минерально-сырьевой базы цеолитов России и стран СНГ. В задачи исследования входило выделение цеолитовых провинций и определение перспективных территорий, изучение условий образования цеолитов различного генезиса, их структурно-текстурных и физико-химических особенностей.

## Вопросы терминологии

Стоит отметить, что при описании месторождений и минерального сырья термин «цеолиты» имеет обобщенное значение. В российской литературе зачастую используются различные термины – цеолиты, природные цеолиты, цеолитизированные туфы, цеолитсодержащие породы. Отсутствие четкой классификации при описании данного типа пород может привести к недопониманию.

\* Ответственный автор: Петр Евгеньевич Белоусов  
e-mail: pitbl@mail.ru

© 2024 Коллектив авторов

Статья находится в открытом доступе и распространяется в соответствии с лицензией Creative Commons Attribution (CC BY) License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Как было отмечено выше, с минералогической точки зрения «цеолиты» представляют собой группу минералов, однако данный термин используют также для обозначения пород и полезного ископаемого.

В советские годы, в особенности при написании геологических отчетов по поискам и разведке месторождений, было принято использовать название первичной материнской породы с добавлением приставки «цеолитизированный», например, «цеолитизированные туфы». В зависимости от содержания минералов группы цеолита в породе прибавлялась приставка – сильно-, средне-, слабоцеолитизированный. В современной литературе данная терминология используется реже и только для пород, где минералы группы цеолита не являются основными. Государственной комиссией по запасам официально утвержден термин «цеолиты» для обозначения типа полезного ископаемого. Таким образом, основываясь на общепринятых классификациях, а также сложившейся в российской и зарубежной современной геологической и технической литературе терминологии (Дистанов и др., 2000; Чекрыжов, Попов, 2001; Зонхоева, 2018; Christidis, 2011; Marantos et al., 2011), авторы настоящей работы считают, что породы, в составе которых преобладают минералы группы цеолитов, и их содержание превышает 40–50%, необходимо называть «цеолитами», а не «цеолитизированными туфами».

Частую, минералы группы цеолита присутствуют в количестве, не превышающим 40%, особенно когда речь идет об опоках и трепелах, где они образуются по кремнистому субстрату, а их содержание примерно равно прочим «полезным» компонентам породы. В этом случае решение о том, к какой группе отнести месторождение – к цеолитам или кремнистому сырью, принимается, основываясь на предполагаемой отрасли использования сырья и, в определенной степени, на коммерческих и маркетинговых планах руководства, принимающего решения о дальнейшей реализации продукции.

Использование термина «цеолитсодержащая» порода имеет неоднозначное значение. В некоторых случаях данная терминология используется для того, чтобы подчеркнуть низкое содержание минералов группы цеолита в породе, обычно не превышающее 10–15%. С другой стороны, при постановке запасов месторождений полезных ископаемых на государственный баланс практикуется использование данного термина для пород с содержанием минералов группы цеолита менее 40%, с учетом того, что их дальнейшее промышленное использование напрямую связано именно с полезными свойствами цеолитов. В качестве примера можно привести Хотынецкое месторождение цеолитсодержащего трепела, которое, несмотря на примерно равное содержание минералов группы цеолита и опал-кristобалита, было поставлено на баланс как месторождение именно цеолита, а не кремнистого сырья.

Термин «цеолитизированная» порода обычно используется в современной геологической литературе для обозначения пород с содержанием минералов группы цеолита в среднем менее 40% (в некоторых случаях до 60%), дальнейшее использование которых напрямую не связано с полезными свойствами цеолитов, но есть необходимость указать на наличие самого процесса

цеолитизации. К «слабоцеолитизированным» относятся породы с содержанием минералов группы цеолита порядка 20–30%.

Термин «природный» цеолит является полным синонимом цеолита с акцентом на указание его естественного происхождения, что связано с большим распространением в промышленности синтетических разновидностей цеолитов.

### Условия образования

На территории России цеолиты распространены повсеместно, они встречаются как в виде примесей в месторождениях силицитов, где их содержание колеблется от первых процентов до 20–40%, так и образуя крупные самостоятельные месторождения «вулканических» цеолитов.

К первому типу относятся цеолиты осадочного типа, в основном встречающиеся в пределах Русской и Сибирской платформ, а также Западно-Сибирской плиты. Для осадочного типа месторождений цеолитов характерно их образование в морских платформенных бассейнах со спокойной гидродинамической обстановкой, в условиях гумидного или полуаридного климата. Материалом для образования служит аморфный хемобиогенный кремнезем, а также алюмосиликатные гели и глинистые минералы (Дистанов и др., 2000; Marantos et al., 2011), которые поступают с речными стоками с суши в морские и озерные бассейны. Цеолиты подобного генезиса имеют широкое распространение и связаны со сносом терригенного материала и процессами выветривания (Муравьев, 1987; Савко, Свиридов, 2014; Савко и др., 2019; Белоусов и др., 2023), однако содержания цеолитов в 30–40% в некоторых случаях связаны также с наложенными или вторичными процессами цеолитообразования.

Крупные месторождения высококачественного так называемого «вулканического» цеолита представлены вулканогенно-осадочным и гидротермальными типами. В большинстве случаев первичным материалом для образования цеолитов являются кислые породы, поскольку аморфный опал-кristобалит неустойчив в щелочной среде. Однако встречаются промышленные месторождения, где образование цеолитов связано и с основными породами. В структурном плане месторождения вулканогенно-осадочного и гидротермального генезиса приурочены к краевым частям платформ, складчатым поясам и рифтогенным зонам, и образуются в периоды активизации вулканической деятельности (Дистанов и др., 2000; Marantos et al., 2011).

Цеолиты вулканогенно-осадочного типа образуются в условиях морских и озерных бассейнов в аридном или гумидном климате. Необходимым условием для образования цеолитов вулканогенно-осадочного генезиса является наличие кислого вулканизма в регионе, повышенный pH вод бассейна осадконакопления (> 7,5), замкнутый тип бассейна или наличие стоячих вод и избыток свободного кремнезема (Дистанов и др., 2000; Christidis, 2011). Процесс цеолитообразования связан с девитрификацией вулканического пепла и туфов в щелочных растворах. Окончательное формирование цеолитизированной залежи происходит на стадии диа- и катогенеза.

Месторождения цеолита гидротермального типа формируются за счет метасоматического замещения вулканогенных пород под действием низкотемпературных (< 200 °С) гидротермальных растворов. Такие месторождения приурочены к прижерловым зонам вулканических поясов и рифтогенным структурам, формируются на склонах палеовулканов (Дистанов и др., 2000; Christidis, 2011). Состав материнских пород может быть разнообразен – риолиты, дациты, в отдельных случаях андезиты и базальты. Цеолитизация происходит по зонам трещиноватости в туфах и раздробленных лавах.

Стоит отметить, что зачастую месторождения цеолитов пространственно связаны с месторождениями перлитов, силицитов, бентонитов, либо каменных и бурых углей. Если в первых двух случаях пространственную связь можно объяснить тем, что перлиты и силициты являются исходным источником легкорастворимого кремнезема, то пространственная связь с угольными бассейнами объясняется тем, что наличие бурых или каменных углей является парагенетическим признаком, свидетельствующим о благоприятных условиях накопления пеплового материала и дальнейшего цеолитообразования – прибрежные морские бассейны, лагуны, заливы и соленые озера (Дистанов и др., 2000; Christidis, 2011). Бентонитовые глины образуются в тех же условиях, что и цеолиты, но при более низких значениях pH и избытке магния в воде (Дистанов и др., 2000; Белоусов, Карелина, 2022; Белоусов и др., 2023).

### Структурно-текстурные особенности

Различные условия образования, а также состав и тип исходного материнского материала влияют на цветовые и текстурно-структурные особенности образовавшихся цеолитовых пород.

Поскольку цеолиты осадочного генезиса в основном находятся в составе опал-кристобалитовых пород в подчиненном количестве, макроскопически у них идентичный с трепелом вид – легкие породы светло-серого и бежевого цвета с массивной, либо толсто-, тонкоплитчатой текстурой (рис. 1а). Они имеют довольно высокое водопоглощение и низкую прочность, легко царапаются.

Вулканогенно-осадочные и гидротермальные цеолиты зачастую наследуют текстурные особенности материнских пород, они имеют либо однородную массивную, либо обломочную брекчиевидную текстуру (рис. 1б, в). Причем обломки могут быть сложены как исходным не преобразованным вулканическим веществом, так и перекристаллизовавшимися цеолитами (рис. 1в). Цветовая гамма вулканогенных цеолитов разнообразна. В основном для них характерны различные оттенки зеленого, голубоватого, бежевого, серого и белого цвета. Более редки розоватые разновидности. Цвет цеолитов зависит не только от их химического состава, но и от минеральных примесей. Как было отмечено в (Белоусов и др., 2024), примеси смектита более 20% могут окрашивать цеолиты в розовые тона (рис. 1г).

Для цеолитов вулканического типа характерна высокая прочность: как и скальные породы они устойчивы к механическому воздействию, но за счет своей природной пористости имеют довольно высокое водопоглощение – до 50–70% от собственного веса.

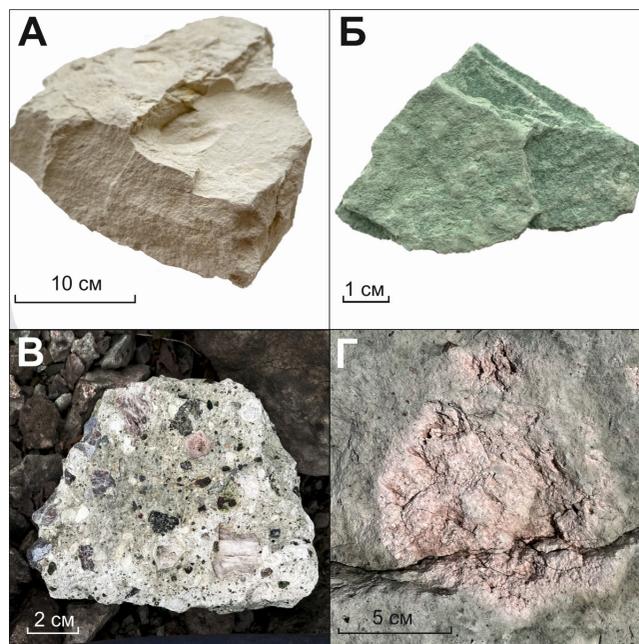


Рис. 1. Макрофотографии цеолитовых пород различных типов: А – массивная однородная цеолитсодержащая порода светло-серого цвета (Хотынецкое м-е, Орловская обл.); Б – тонкоплитчатый мелкозернистый цеолит зеленоватого цвета (м-е Хонгуруу, Респ. Саха (Якутия)); В – цеолитизированный туф с брекчиевой структурой (Ягоднинское м-е, Камчатский край); Г – гнездо розового цвета с повышенным содержанием смектита в цеолитовой породе (Ягоднинское м-е, Камчатский край)

Микроструктуры цеолитов разнообразны и представлены как скрытокристаллическими, так и хорошо раскристаллизованными разновидностями. Наиболее активно кристаллизация развивается в полостях и порах пород.

Для цеолитовых пород осадочного генезиса в основном характерны алевритовые и алевропелитовые структуры с реликтами диатомовых водорослей и радиолярий (рис. 2а, б). Минералы группы цеолита присутствуют либо в виде тонкокристаллических игольчатых агрегатов, либо в скрытокристаллическом виде. Для цеолитовых пород вулканогенного генезиса больше характерны хорошо раскристаллизованные агрегаты игольчатой, призматической или пластинчатой формы (рис. 2в, г).

### Минерально-сырьевая база

#### Страны СНГ

На территории стран СНГ расположены крупные месторождения цеолитов, активно разрабатывавшиеся еще со времен СССР: Ноемберянская и Ширакская группы месторождений (Республика Армения), Айдагское месторождение (Республика Азербайджан), Сокерницкое месторождение (Украина), Тедзамское и Дзегвское месторождения (Грузия), Тайжузгенское и Чанканайское месторождения (Республика Казахстан). В основном они относятся к вулканическому типу, многие из них являются источником высококачественного сырья, импортировавшегося не только в Россию, но и страны Европы.

Ноемберянская и Ширакская группы месторождений цеолитов расположены в Армении. Содержание цеолита в породах составляет порядка 55–65%. В основном

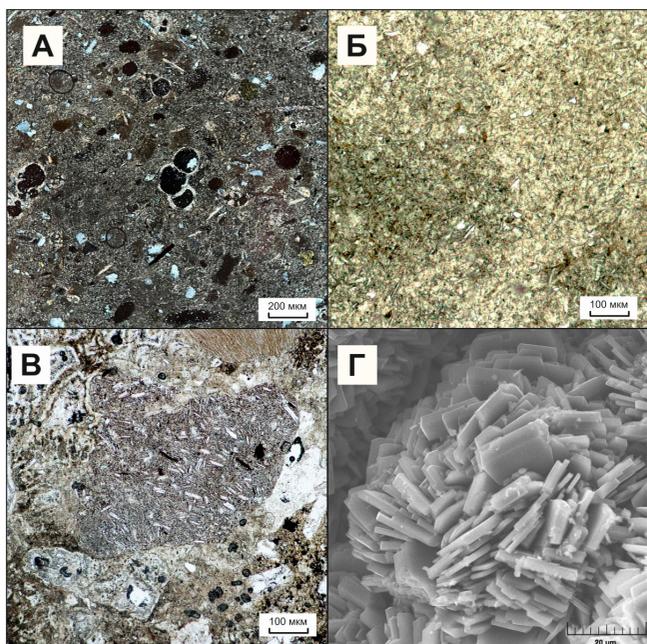


Рис. 2. Микрофотографии образцов цеолитовых пород различных месторождений России: А – фоссилии радиолярий с игольчатыми агрегатами клиноптилолита в глинисто-кремнистой массе (Хотынецкое м-е, Орловская обл.); Б – витрокластический туф, замещённый скрытокристаллическим клиноптилолитом (м-е Хонгуруу, Респ. Саха (Якутия)); В – обломок породы, замещённый кристаллами клиноптилолита в цеолитизированной брекчии (Ягоднинское м-е, Камчатский край); Г – табличчатые кристаллы клиноптилолита (Ягоднинское м-е, Камчатский край)

цеолит представлен клиноптилолитом и в некоторых случаях стильбитом, морденитом и анальцимом. Запасы Ноемберянской группы месторождений составляют порядка 25 млн т (Джрбашян и др., 1999). На данный момент добыча идет только на месторождении Нор Кохб, входящем в Ноемберянскую группу. Цеолиты этого месторождения составляют основной объем российского импорта.

Айдагское месторождение цеолитов расположено в Тавузском районе Азербайджана, его запасы составляют порядка 25 млн т. Содержание клиноптилолита составляет порядка 55–65% (Буров и др., 1990). По аналогии с Даш-Салахлинским и Иджеванским месторождениями бентонита, Айдагское месторождение цеолитов находится в одной и той же геологической структуре с Ноемберянской группой и связано с развитием вулканизма северной части Казахского прогиба Малого Кавказа (Наседкин, Ширинзаде, 2008).

Сокерницкое месторождение цеолитов является крупнейшим на Украине, оно расположено в Закарпатской области, а его запасы превышают 100 млн т. Цеолиты относятся к вулканическому типу, их содержание составляет ~70%. Породы в основном представлены клиноптилолитом (Буров и др., 1990).

Тедзамское и Дзегвское месторождения цеолитов расположены в Грузии вблизи г. Тбилиси и приурочены к одной и той же геологической структуре. Цеолиты представлены клиноптилолитом, его содержание составляет порядка 60–70%. Запасы обоих месторождений составляют несколько десятков млн т (Буров, 1990).

Месторождения цеолита Казахстана представлены Тайжугзенским и Чанканайским месторождениями, расположенными в Тарбагатайском и Кербулакском районах. Их запасы составляют 7 и 5,5 млн т соответственно (Васильянова, Лазарева, 2016).

### Месторождения цеолитов России

На территории России выявлено порядка 120 месторождений и проявлений цеолитов, однако на государственном балансе учитываются всего 18 месторождений с запасами категории А+В+С<sub>1</sub> – 594 млн т и категории С<sub>2</sub> – 799 млн т (Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации: «Цеолиты», 2019) (рис. 3, табл. 1). Добыча цеолитовых пород имеет незначительные масштабы. Разрабатывается всего 4 месторождения: Хотынецкое (Орловская область) с запасами категории А+В+С<sub>1</sub> 6,9 млн т, Хонгуруу (Республика Саха (Якутия)) с запасами категории А+В+С<sub>1</sub> 11,3 млн т, а также Холинское (Забайкальский край) и Чугуевское (Приморский край) с запасами категории А+В+С<sub>1</sub> 129,6 и 20,6 млн т соответственно. Суммарная годовая добыча составляет порядка 60–80 тыс. т (Белоусов и др., 2020). Прогнозные ресурсы цеолитового сырья на территории России составляют сотни миллионов тонн. Практически весь добываемый материал идет на производство гигиенических подстилок животным, грунта для домашних растений, в качестве добавки в бетон и для производства пеностекла, тогда как использование цеолитов в высокотехнологических отраслях находятся в стадии развития.

Основываясь на административном делении, выделяются пять крупных цеолитовых провинций: Центральная, Южная, Уральская, Сибирская и Дальневосточная.

Цеолиты **Центральной и Южной провинций** в основном относятся к осадочному типу и приурочены к месторождениям опал-кристобалитового сырья и карбонатным породам – диатомитам, трепелам, опокам, известнякам, мергелям и имеют меловой возраст. Содержание цеолита в породе в большинстве случаев не превышает 10–15%, они встречаются в виде примесей. В отдельных случаях содержание цеолита достигает 30–40%, как на Хотынецком (Орловская область) и Татарско-Шатрашанском (Республика Татарстан) месторождениях цеолитсодержащих пород (рис. 3, табл. 1). Хотынецкое является единственным в центральном и южном регионах месторождением, числящимся на балансе с запасами категории А+В+С<sub>1</sub> порядка 6,9 млн т. На данный момент месторождение разрабатывается.

В целом стоит отметить, что большинство терригенно-кремнистых месторождений Центральной России зачастую содержат небольшую примесь минералов группы цеолита (Савко и др., 2001, 2009, 2019а, б; Савко, Свиридов, 2014; Муравьев, Воронин, 1979; Муравьев, 1983, 1987; Бушинский, Шуменко, 1970; Семенов и др., 1974; Сеньковский, 1977, 1980; Жабин, Дмитриев, 2002). По данным С.О. Зориной с соавторами (2008), на территории Волгоградской, Ульяновской, Саратовской, Пензенской и Астраханской областях, а также в Республике Мордовия выделена серия литостратиграфических подразделений. К ним относятся карбонатные и кремнистые цеолитсодержащие породы мелового возраста. Содержание минералов группы цеолита составляет в среднем 5–20%.

Проведенные А.Э. Хардиковым с соавторами (2000) исследования терригенно-кремнистых, глинистых и вулканических пород юга России позволили выделить серию цеолитосодержащих площадей в стратиграфическом интервале от средней юры до позднего плиоцена. Они расположены на территории Краснодарского края, Ростовской области, Республик Кабардино-Балкария и Дагестан. Содержание минералов группы цеолита также не высоко.

А.Р. Юсуповым с соавторами (2021) на территории Республики Дагестан изучены цеолитосодержащие кремнистые породы. Выделены перспективные участки Леваши и Дюбек, со средним содержанием цеолитов порядка 20–40%. Прогнозные ресурсы цеолитосодержащих пород составили 119 млн т категории  $P_1$  и  $P_2$ .

С геологической точки зрения, по аналогии с Закавказьем, стоит отметить высокий потенциал и перспективность на дальнейшие поиски цеолитов российской части Кавказа, где в пределах молодых орогенов имеются благоприятные условия для цеолитообразования.

Балансовые запасы **Уральской провинции** категории  $A+B+C_1$  и  $C_2$  составляют порядка 34,6 и 27,7 тыс. т соответственно. Люльинское и Мысовское месторождения приурочены к вулканогенно-осадочным отложениям среднего и верхнего девона, расположены на территории Ханты-Мансийского автономного округа – Югры (ХМАО) (рис. 3, табл. 1). Оба месторождения числятся на балансе, но не разрабатываются. Для месторождений характерно высокое содержание клиноптилолита – 70–90%, но низкие запасы.

Запасы **Сибирской провинции** составляют всего 5,9 млн т категории  $A+B+C_1$  и представлены Пегаским месторождением (уч. Западно-Пегаский) в Кемеровской области (рис. 3, табл. 1) (Корецкий, Игнатова, 2010).

К месторождениям, не числящимся на балансе, относятся Сахатинское и Пашенское в Красноярском крае, Малоеланское, Оёкское, Кудинское и Ушаковское в Иркутской области (рис. 3, табл. 1) (Белицкий, Фурсенко, 1992).

Месторождения Сибирской провинции относятся к юрской, меловой и каменноугольной системам. В структурном плане они приурочены к складчатым поясам. Образование этих месторождений напрямую связано с вулканической деятельностью.

По аналогии с Центральной и Южной провинцией, на территории Сибири также широко распространены месторождения кремнистого сырья, представленные опокой, диатомитом и трепелом, где зачастую минералы группы цеолита встречаются в виде примеси до 5–15% (Смирнов, Константинов, 2016, 2017; Муравьев, 1983, 1987).

**Дальневосточная провинция** занимает первое место по запасам и включает в себя целый ряд месторождений цеолита с балансовыми запасами категории  $A+B+C_1$  581,2 млн т и  $C_2$  799,7 млн т. К ним относятся следующие месторождения: Мухор-Талинское (уч. Мухор-Булыкский) в Республике Бурятия; Бадинское, Холинское и Шивыртуйское в Забайкальском крае, Хонгуруу в Республике Саха (Якутия); Вангинское и Куликовское в Амурской области (Склярова, 2021; Рогулина, Юрков, 2006); Середочное в Хабаровском крае; Чугуевское в Приморском крае; Флора в Магаданской области; Лютогское и Чеховское в Сахалинской области; Пастбищное в Чукотском автономном округе и Ягоднинское в Камчатском крае. К месторождениям, не числящимся на балансе, относятся Гавриловское в Республике Бурятия, Радденское в Еврейской автономной области, Хурчан в Магаданской области и Новгородское в Приморском крае (рис. 3, табл. 1).



Рис. 3. Обзорная карта месторождений и проявлений цеолита России. Наименования объектов см. в табл. 1

№	Месторождение	Область	Возраст	Генетический тип	Основной минерал цеолитов*	Среднее содержание цеолитов, %	Запасы, млн т **	Степень освоения
<b>Числящиеся на балансе</b>								
1	Хотынецкое (уч. Образцовский)	Орловская обл.	K <sub>2</sub>	вулканогенно-осадочный	кл	20–40	6,9	Разрабатываемое
2	Люльинское	ХМАО	D <sub>2,3</sub>	вулканогенно-осадочный	кл, мр, шб	70	0,018	Не переданное в освоение
3	Мысовское					> 90	0,027	Не переданное в освоение
4	Пегасское (уч. Западно-Пегасский)	Кемеровская обл.	T	вулканогенно-осадочный	гл, кл	50–60	5,9	Не переданное в освоение
5	Мухор-Талинское (уч. Мухор-Булькский)	Бурятия	J	гидротермальный	мр, кл	60	1,7	Подготавливаемое к освоению
6	Бадинское	Забайкальский край	J <sub>3</sub> -K <sub>1</sub>	гидротермальный	кл, мр	70	9,8	Не переданное в освоение
7	Холинское (уч. Мохейский)			гидротермальный	кл	50–70	383,5	Разрабатываемое
8	Шивыртуйское			вулканогенно-осадочный	кл	50–80	803,2	Не переданное в освоение
9	Хонгуруу	Республика Саха (Якутия)	D <sub>3</sub> -C <sub>1</sub>	вулканогенно-осадочный	кл, гл	70–80	11,3	Разрабатываемое
10	Вангинское	Амурская область	K <sub>1</sub>	?вулканогенно-осадочный	кл, гл	50–60	0,9	Не переданное в освоение
11	Куликовское			?гидротермальный	мр, кл	40	14,1	Не переданное в освоение
12	Середочное	Хабаровский край	P <sub>1,3</sub>	?гидротермальный	мр, кл	50–60	52,1	Не переданное в освоение
13	Чугуевское	Приморский край	P <sub>1,3</sub>	гидротермальный	кл	60–80	20,6	Разрабатываемое
14	Флора	Магаданская обл.	K <sub>2</sub>	гидротермальный	лм	40	12,9	Не переданное в освоение
15	Чеховское (уч. Тобутский)	Сахалинская обл.	P <sub>3</sub> -N <sub>1</sub>	вулканогенно-осадочный	кл	60	31,8	Нераспределенный фонд
16	Лютюгское			вулканогенно-осадочный	кл	50–60	11,5	Не переданное в освоение
17	Пастбищное	Чукотский АО	K <sub>2</sub>	вулканогенно-осадочный	кл	40–90	7,1	Не переданное в освоение
18	Ягоднинское	Камчатский край	N <sub>2</sub>	гидротермальный	кл	70	19,7	Разрабатываемое
<b>Не числящиеся на балансе</b>								
19	Леваши	Республика Дагестан	K <sub>2</sub> -P <sub>1</sub>	осадочный	нет данных	30–40	119	
20	Дюбек	Республика Татарстан	K	осадочный	кл	35	100	
22	Татарско-Шатрашанское	Красноярский край	C <sub>1</sub>	вулканогенно-осадочный	гл, кл	10–60		
23	Сахаптинское					30–60	414	
24	Пашенское	Иркутская обл.	J	нет данных	гл, кл	–	82	
25	Оёкское			нет данных		–	–	
26	Гавриловское	Республика Бурятия	J <sub>2</sub>	гидротермальный	кл	60	21,4	
27	Радденское	Еврейская автономная обл.	K	нет данных	кл	60–75	30	
28	Новгородское	Приморский край	P <sub>2,3</sub>	гидротермальный	кл, гл	50–70	3,5–4	
29	Хурчан	Магаданская обл.	K	вулканогенно-осадочный	кл, мр	70–90	30	
30	Кудинское проявление	Иркутская обл.	J	нет данных	гл, кл	20–30	393	
31	Ушаковское проявление					20–30	203	
32	Проявление Водораздельное	Приморский край	P	гидротермальный	кл, гл	30–80		
33	Проявление Лосёвское							
34	Проявление Шандуйское					45–90		
35	Проявление Кисинское							
36	Проявление Колобёнкинское					60–70	2	
37	Проявление Шведовское					40–90	1	
38	Проявление Фурмановское					< 50		
39	Проявление Дорожное							
40	Проявление Устиновское							20
41	Проявление Берёзовое							

Табл. 1. Месторождения и проявления цеолитов России. \*Сокращения: кл – клиноптилолит; гл – гейландит; мр – морденит; шб – шабазит; лм – ломонит. \*\* для месторождений, числящихся на балансе, – запасы категории A+B+C<sub>1</sub>+C<sub>2</sub>; не числящихся на балансе – прогнозные ресурсы категории P

Все месторождения этой провинции имеют гидротермальный, либо вулканогенно-осадочный генезис, приурочены к складчатым поясам и имеют юрский, меловой, палеогеновый и неогеновый возраст. Исключением является месторождение Хонгуруу, имеющее девон-каменноугольный возраст. Более детальное описание этого месторождения приведено в следующем разделе.

Вдоль побережья Приморского края располагается серия проявлений цеолита – Водораздельное, Лосёвское, Шандуйское, Кисинское, Колобёнкинское, Шведовское, Устиновское, Фурмановское, Дорожное и Берёзовое. Все они приурочены к депрессиям и впадинам и, по-видимому, имеют вулканогенно-осадочный генезис (рис. 3, табл. 1).

Учитывая, что балансовые запасы месторождений цеолита Дальневосточного региона являются самыми крупными в России и обладают высоким качеством сырья, можно с уверенностью назвать Дальний Восток недооцененным и наиболее перспективным регионом. К примеру, по данным (Буров и др., 1990), выделяется Дальневосточная цеолитоносная провинция с пятью районами, включающими вулканогенные комплексы различного возраста с запасами цеолитового сырья в сотни миллионов тонн.

1. *Приморский цеолитоносный район* включает в себя территории Приморского и юга Хабаровского края и представлен гидротермальными и реже вулканогенно-осадочными отложениями палеогенового возраста, приурочен к Сихотэ-Алиньскому вулканическому поясу.

2. *Охотско-Чукотский цеолитоносный район* расположен на территории Магаданской области и северной части Хабаровского края, приурочен к верхнемеловым вулканическим породам Охотско-Чукотского пояса и геосинклинальным терригенно-туфогенным отложениям Пенжино-Анамырской и Коряжской складчатых зон.

3. *Сахалинский цеолитоносный район* представлен вулканогенно-осадочными миоценовыми цеолитизированными туфами различного состава.

4. *Курильский цеолитоносный район* представлен гидротермальными и вулканогенно-осадочными цеолитами неогенового возраста.

5. *Камчатский цеолитоносный район* в основном представлен гидротермальными месторождениями цеолита неогенового возраста, приуроченными либо к перлитовым породам прижерловой части вулканов, либо терригенно-туфогенным отложениям вулканотектонических депрессий.

## **Перспективы расширения минерально-сырьевой базы цеолитов России**

Несмотря на значительные запасы цеолитов на территории России, объемы его добычи остаются на весьма низком уровне. Это связано, в первую очередь, с недостаточной степенью изученности уже известных объектов, территориальной удаленностью месторождений высококачественного сырья от логистических центров и крупных производств, а также с отсутствием современных технологий, позволяющих использовать цеолиты не только в исходном виде, с минимальными затратами на производство, но и получать более наукоемкую продукцию, такую как ионно-обменные фильтры для очистки воды и газов, нанокомпозитные удобрения, средства

доставки лекарственных препаратов в организм человека, катализаторы различного характера и т.п.

Для более полного понимания перспектив расширения минерально-сырьевой базы цеолитов России рассмотрим наиболее важные объекты, учитывая степень их освоения, качество сырья и удаленность от транспортных каналов.

### ***Месторождения, числящиеся на балансе***

Стоит отметить, что довольно большая часть месторождений, числящихся на балансе в статусе не переданных в освоение, была подготовлена к разработке или разрабатывалась в конце XX или начале XXI века. Но по разным причинам работы были приостановлены. В большинстве случаев это связано с приостановкой финансирования.

На Бадинском, Холинском и Шивыртуйском (Забайкальский край) месторождениях за последние 30 лет велась эпизодическая добыча цеолитов. Однако в связи с необходимостью дополнительных вложений, а также низкой степенью востребованности в цеолитовом сырье в начале 2000-х и не самой простой логистикой, добыча на большинстве месторождений была приостановлена. На данный момент добыча ведется только на Холинском месторождении и не превышает 1–2 тыс. т в год. Учитывая крупные запасы месторождений, высокую степень геологической изученности и качества сырья, данные объекты заслуживают более детального внимания и переоценки возможности их доизучения и увеличения объемов добычи.

Чугуевское месторождение (Приморский край) гидротермального цеолита на данный момент находится в статусе разрабатываемых. Однако объемы добычи находятся на низком уровне. Для данного месторождения характерны высокие эксплуатационные свойства и содержание клиноптилолита, а также близость к ж/д путям.

Мухор-Булыкский участок Мухор-Талинского месторождения (Республика Бурятия) состоит в распределенном фонде в перечне подготавливаемых к освоению. Сырье данного месторождения относится к высококачественным цеолитам вулканического происхождения, а его относительная близость к ж/д путям (14 км ст. Новоильинск) делает его привлекательным объектом в экономическом плане (Гордиенко, Жамойцина, 1995).

Ягоднинское месторождение (Камчатский край) гидротермального цеолита в 90-е годы прошлого века подготавливалось к эксплуатации, однако существенная добыча так и не была налажена. Основной проблемой на месторождении является значительная удаленность от промышленных предприятий, где данное сырье могло бы использоваться, а также с необходимостью в строительстве дороги до г. Петропавловск-Камчатский. Однако в связи с наличием уникальных по своим свойствам калиевых цеолитов, Ягоднинское месторождение по праву можно отнести к группе наиболее перспективных объектов.

Люльинское и Мысовское (ХМАО) месторождения числятся на балансе в нераспределенном фонде, хотя на Люльинском месторождении ранее проводилась добыча. Несмотря на небольшие запасы, некоторыми исследователями отмечалось высокое качество сырья (содержание клиноптилолита до 90%) и потенциал в значительном

приросте запасов при проведении дополнительных геологоразведочных работ<sup>1</sup> (Валиева, Нефедов, 2011).

**Месторождения, не числящиеся на балансе**

В Магаданской области, вблизи Калымской автомагистрали расположена цеолитоносная провинция, представленная цеолитизированными витро- и литокластическими туфами кислого состава. Общие прогнозные запасы цеолитов составляют порядка 100 млн т (Белицкий, Фурсенко, 1992). Наиболее перспективным является участок Хурчан, где содержание цеолитов составляет более 70%. Таким образом, цеолитоносная провинция Магадана является перспективной для постановки работ на поиск и разведку высококачественного сырья.

В Приморском крае помимо Чугуевского месторождения, цеолитоносность повсеместно развита в пределах Восточно-Сихотэ-Алинского вулканического пояса, начиная с Новгородского месторождения на юге и заканчивая Водораздельным проявлением на севере. В целом насчитывается более десятка месторождений и проявлений с высоким содержанием цеолитов (Чекрызов, Попов, 2001).

Также при постановке работ на поиск и разведку новых объектов цеолитового сырья стоит обратить внимание на Кавказский регион, где имеются благоприятные геологические условия для локализации цеолитов вулканического типа и развитая инфраструктура.

**Примеры наиболее важных промышленных месторождений цеолита России**

С целью понимания отличий в условиях образования, геологическом строении и составе месторождений различного генезиса в данной работе будут более детально рассмотрены наиболее важные промышленные месторождения вулканогенно-осадочного (Хонгуруу, Республика Саха) и гидротермального (Ягоднинское, Камчатский край) генезиса. Хотынецкому месторождению цеолитсодержащего трепела, относящемуся к осадочному типу, посвящена отдельная статья (Белоусов и др., 2023), поэтому в настоящей работе оно рассмотрено не будет.

**Ягоднинское месторождение (Камчатский край)**

Ягоднинское месторождение гидротермальных цеолитов расположено на юге п-ова Камчатка в Елизовском районе, в 60 км к западу от г. Петропавловск-Камчатский. В геологическом отношении район приурочен к Верхнекарымшинской вулканической зоне, входящей в Южно-Камчатский антиклинорий (рис. 4). Вдоль одного из крупных разломов субширотного простирания происходит разгрузка термальных вод современной Больше-Банной гидротермальной системы.

В центральной части района расположен кислый вулканический массив верхнемиоцен-плиоценового возраста, с которым непосредственно связано месторождение перлита и цеолитов (Наседкин, Наседкина, 1980; Наседкин и др., 1985, 1988). Вулкан представляет собой сложную систему лавовых потоков, пирокластических отложений и экструзивных тел. Цеолитовым сырьем

является измененный витрокластический туф риодацитов, залегающий в основании вулканического комплекса непосредственно на дацитах, а также цеолитизированные перлиты (Наседкин, Наседкина, 1980; Наседкин и др., 1985, 1988).

Собственно, цеолиты или сильноцеолитизированные туфы представлены однородными скальными породами зеленоватого и серо-зеленоватого цвета с массивной текстурой и реликтами литокластов до 10 см в длину. В зависимости от содержания минералов группы цеолита выделяются несколько типов пород: 1) неизменные перлиты с характерной перлитовой структурой; 2) собственно цеолитовые породы зеленоватого и серо-зеленоватого цвета с массивной текстурой и с содержанием минералов группы цеолита порядка 60–70%; 3) цеолитизированные туфы бледно зеленого цвета с массивной текстурой и содержанием минералов группы цеолита 30–60%; 4) слабоцеолитизированные туфобрекчии, состоящие из грубообломочного материала, с содержанием цеолитов 20–30% (рис. 1в).

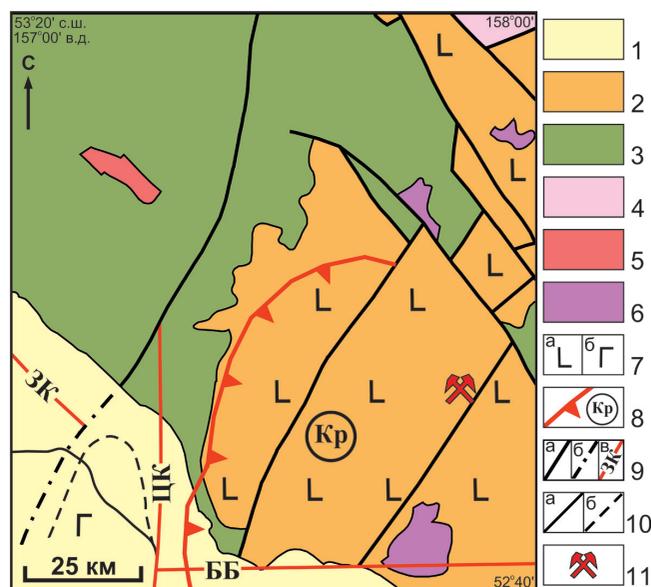


Рис. 4. Тектоническая схема района Ягоднинского месторождения п-ва Камчатка по (Сляднев и др., 2006, с изменениями и дополнениями). Условные обозначения: 1–2 – Среднемиоцен-четвертичный структурный ярус: 1 – прибрежно-морские и вулканические образования плиоцен-четвертичного подъяруса, 2 – осадочные отложения и вулканические образования среднемиоцен-плиоценового подъяруса; 3 – метаморфизованные терригенные отложения, терригенно-вулканогенные и вулканические образования нижнемел-нижнеэоценового структурного яруса; 4 – метаморфические образования домезозойского структурного яруса; 5–6 – интрузивные образования: 5 – мелпалеоценового возраста кислого и среднего состава, 6 – эоцен-плиоценового возраста разного состава; 7 – наложенные вулканические пояса и зоны (а – Южно-Камчатский пояс; б – Толбачикско-Ключевская рифтогенная вулканическая зона); 8 – вулcano-тектоническая структура (Кр – Карымшинская); 9 – разломы (а – главные структурообразующие, выходящие на дневную поверхность; б – скрытые под вышележащими образованиями; в – глубинные разломы по геофизическим данным (ББ – Больше-Банной, ЗК – Западно-Камчатский, ЦК – Центрально-Камчатский); 10 – границы (а – ярусов, подъярусов, наложенных вулканических поясов и зон, интрузивных тел; б – грабен и горстов); 11 – Ягоднинское месторождение

<https://www.uralinform.ru/news/economy/65897-dorazvedka-mestorojdeniya-yugorskih-ceolitov-dast-tolchok-razvitiyu-pharmaceutiki/>

Цеолиты в основном представлены клиноптилолитом и в меньшей степени гейландитом, морденитом и стильбитом. Основная масса цеолитовой породы сложена плотными агрегатами со скрытокристаллической структурой (рис. 2б), но встречается и хорошо раскристаллизованный клиноптилолит различной морфологии, заполняющий поровое пространство (рис. 2г) (Белоусов и др., 2024).

Запасы месторождения категории А+В+С<sub>1</sub> составляют 7,3 млн т. На данный момент месторождение не разрабатывается, но проведенные исследования позволяют отнести цеолиты Ягоднинского месторождения к высококачественному сырью.

### Месторождение Хонгуруу (Республика Саха)

Месторождение Хонгуруу расположено в Республике Саха (Якутия), в 91 км к юго-востоку от с. Сунтар и относится к вулканогенно-осадочному типу. В структурном плане месторождение приурочено к западной части Вилюйской синеклизы и находится в пределах Кемпендяйской впадины.

В геологическом строении территории принимают участие девонские вулканогенно-осадочные отложения кемпендяйской свиты ( $D_3km$ ) и верхнедевонско-нижнекаменноугольные вулканогенно-осадочные отложения курунгуряхской свиты ( $D_3-C_1kr$ ), к которым и приурочена продуктивная толща цеолитов (Колодезников и др., 1992; Сафронов и др., 2004) (рис. 5).

Кемпендяйская свита ( $D_3km$ ) представлена пестроцветными вулканогенно-терригенно-карбонатными породами. Свита подстилается пластом каменной соли и согласно перекрывается образованиями верхнедевонско-нижнекаменноугольного возраста. Мощность вскрытой части кемпендяйской свиты в разрезе составляет 174 м. Основную часть свиты составляют терригенные породы.

Курунгуряхская свита ( $D_3-C_1kr$ ) согласно залегает на образованиях верхнего девона. Мощность изученной части – 166,3 м. В разрезе свиты выделяются пласты цеолитовых туфов. Основная часть разреза сложена карбонатными породами.

Всего на месторождении выделяются 4 пласта цеолитов, имеющих северо-восточное простирание и моноклинально погружающихся под углом 25–45°. Мощность пластов колеблется от 5,6 до 11 м, они залегают согласно с вмещающими их осадочными и вулканогенными породами. Прослежены пласты на расстояние 6–8 км, их строение изучено до глубины 100–160 м. Запасы категории А+В+С<sub>1</sub> составляют 11,3 млн т. Месторождение разрабатывается, ежегодная добыча составляет порядка 30–50 тыс. т (Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации: «Цеолиты», 2019).

Цеолиты в основном имеют светло-зеленоватый, зеленовато-серый цвет. В некоторых случаях встречаются бежевые разности. Преобладают массивные, тонко- и толстоплитчатые текстуры (рис. 16).

Содержание минералов группы цеолита в усредненной промышленной пробе составляет порядка 76%, они в основном представлены клиноптилолитом и гейландитом. По составу обменных катионов выделяются породы как кальциево-натриевого типа, так и магнезиально-кальциевого.

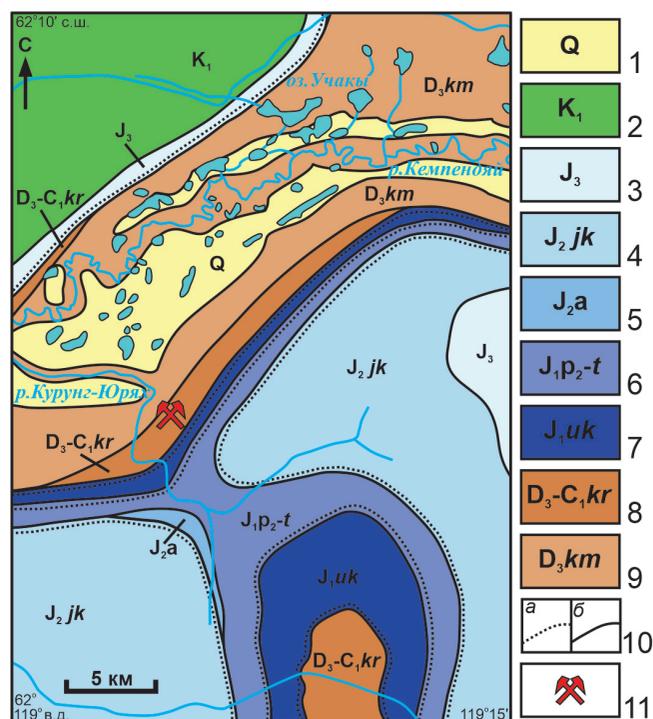


Рис. 5. Геологическая карта района месторождения цеолитов Хонгуруу (Республика Саха) по (Нахабцев и др., 1975; Петрова и др., 1993, с изменениями и дополнениями). Условные обозначения: 1 – четвертичные отложения нерасчлененные: суглинки, супеси, торф, пески, галечники, ил; 2 – терригенные отложения мелового возраста нерасчлененные: пески с прослоями песчаников, алевролитов, мергелей, известняков, галечников и аргиллитов; 3–7 – терригенные отложения юрского возраста; 3 – нерасчлененные отложения: пески, глины, алевролиты, аргиллиты, угли; 4 – пески, песчаники, алевролиты, аргиллиты, гравелиты якутской свиты; 5 – пески с прослоями песчаников ааленского яруса; 6 – аргиллиты, алевролиты, пески, песчаники, известняки верхнепермского подъяруса – тоарского яруса; 7 – пески с прослоями песчаников, галечников, гравелитов, алевролитов, аргиллитов, конгломератов укугутской свиты; 8 – верхнедевонско-нижнекаменноугольные вулканогенно-осадочные отложения курунгуряхской свиты: доломиты, известняки, мергели, аргиллиты, туфоалевролиты, туффиты, туфы, песчаники, ангидриты; 9 – девонские вулканогенно-осадочные отложения кемпендяйской свиты: алевролиты, аргиллиты, песчаники, мергели, витрокластические туфы и туффиты, ангидриты, каменная соль; 10 – границы стратиграфического контакта: а – несогласного, б – согласного; 11 – месторождение Хонгуруу

Причем кальциевые разности в основном представлены гейландитом.

Образование цеолитов месторождения Хонгуруу связано с преобразованием терригенного и пеплового материала, накапливающегося в прибрежных лагунах и приливно-отливных зонах с водами с повышенной соленостью.

Стоит отметить, что верхнедевонско-нижнекаменноугольные отложения Кемпендяйской впадины повсеместно являются цеолитоносными. Еще в 1983 г. К.Е. Колодезниковым был выделен Кемпендяйский цеолитоносный район (Николаев и др., 1993), где насчитывается серия месторождений цеолита, однако на балансе числится только месторождение Хонгуруу.

**Сравнительная характеристика состава и свойств цеолитов промышленно важных месторождений России и стран СНГ**

В данном разделе представлены сравнительная характеристика основных промышленно важных месторождений цеолита России и стран СНГ на примере Хотынецкого (Орловская область), Хонгуруу (Республика Саха), Ягоднинского (Камчатский край), Холинского (Забайкальский край), Нор Кохб (Республика Армения) и Сокерницкого (Украина) месторождений.

По минеральному составу образцы всех изученных месторождений, за исключением пород Хотынецкого месторождения, состоят более чем на 50% из минералов группы цеолита (табл. 2, рис. 6). Как было описано выше, полезным компонентом Хотынецкого месторождения считается сумма минералов группы опал-кristобалита, смектита и цеолита.

Поскольку диагностика конкретного минерала из группы цеолитов является не тривиальной задачей, применялся набор методов, включающий рентгенофазовый, рентгенофлуоресцентный анализы, инфракрасную спектроскопию и термический анализ. Для пород Хотынецкого, Сокерницкого и Нор Кохб месторождений цеолиты представлены преимущественно клиноптилолитом. В породах Ягоднинского месторождения в основном встречается клиноптилолит и в меньшей степени морденит, стильбит и гейландит. Для пород Хонгуруу и Холинского месторождения характерно содержание как клиноптилолита, так и гейландита, причем на месторождении Хонгуруу гейландит образует самостоятельные разности.

Все образцы рассматриваемых месторождений имеют характерный состав породообразующих оксидов. Соотношение кремния к алюминию в среднем составляет 5–6 ед., что отвечает породам клиноптилолит-гейландитового ряда (табл. 3). Исключением является Ягоднинское месторождение, соотношение кремния к алюминию которого составляет 8,9 ед.

Величина удельной поверхности и пористости изучаемых образцов колеблется в пределах 13–31 ед., что также

является характерным для цеолитовых пород (табл. 4). Поскольку молекулы азота при определении величины удельной поверхности не могут проникнуть в каналы цеолита, данная величина характеризует мезо и макропоры, которыми в основном и сложены породы. Наличие микропор наблюдается только у образцов Ягоднинского и Хотынецкого месторождений.

Наиболее показательной характеристикой сорбционной активности цеолитов является емкость катионного обмена (ЕКО). Максимальная величина ЕКО приходится на образцы Ягоднинского, Хонгуруу, Нор Кохб и Сокерницкого месторождений и составляет 205, 202, 199 и 190 мг-экв/100 г соответственно, что в первую очередь связано с высоким содержанием минералов цеолитовой группы в породе (табл. 5). Величина ЕКО Холинского

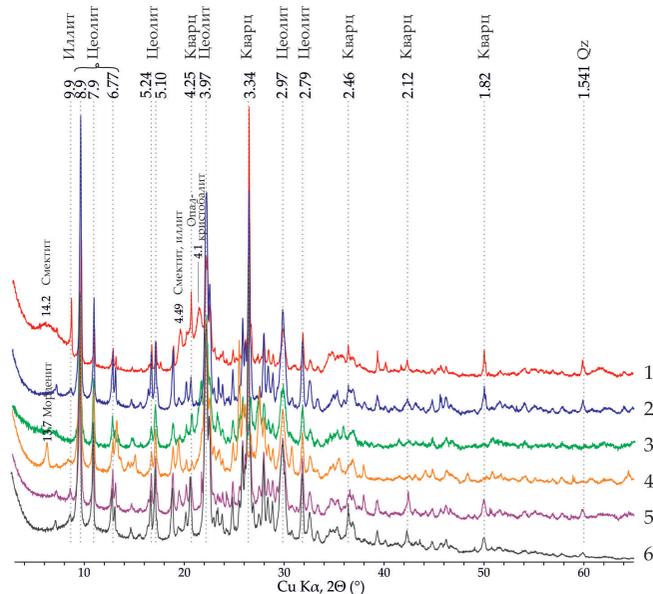


Рис. 6. Репрезентативные рентгеновские дифрактограммы образцов цеолитов: 1 – Хотынецкое; 2 – Хонгуруу; 3 – Холинское; 4 – Ягоднинское; 5 – Нор Кохб; 6 – Сокерницкое

Месторождение	Цеолит	Смектит+ ССМ	Иллит	Аморф SiO <sub>2</sub>	Кристобалит	Тридимит	Кварц	Полевые шпаты	Кальцит	Анализ
Хотынецкое	28,0	22,4	6,1	27,8	1,2	1	8,4	4,0	0,4	0,7
Хонгуруу	76,6	6,4	3,8	–	–	–	9,1	4,1	–	–
Холинское	57,8	15,8	–	–	4,2	–	0,7	21,4	–	–
Ягоднинское	69,3	–	14,1	–	7,8	–	–	8,8	–	–
Нор Кохб	61,7	8,7	10,2	–	0,6	–	10,8	6,7	1,3	–
Сокерницкое	71,8	1,4	8,4	–	–	–	15,0	3,4	–	–

Табл. 2. Минеральный состав образцов цеолитов, масс. %

Месторождение	ППП*	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>
Хотынецкое	6,29	1,66	0,33	11,85	71,81	4,54	2,27	0,14	0,052	0,91	0,01	<0,01
Хонгуруу	13,17	2,84	1,33	11,69	64,88	1,32	2,55	0,19	0,021	1,10	0,03	<0,02
Холинское	6,03	2,22	0,26	13,11	70,77	4,53	1,63	0,13	0,070	1,11	0,01	<0,01
Ягоднинское	10,27	0,11	1,53	8,09	71,97	1,50	1,98	0,50	0,004	3,58	0,27	<0,01
Нор Кохб	9,53	2,65	1,09	11,93	66,91	2,32	3,29	0,24	0,023	1,72	0,06	<0,01
Сокерницкое	8,56	1,48	0,65	13,14	68,62	3,35	2,38	0,16	0,041	1,11	0,02	<0,02

Табл. 3. Химический состав образцов цеолитов, масс. %. \*ППП – потери при прокаливании

Месторождение	Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /г	Объем пор, нм	Средний диаметр, нм	Объем микропор, см <sup>3</sup> /г	Распределение пор по размеру, %	
					микропоры	мезо-макропоры
Хотынецкое	26,8	0,089	3,77	<0,001	14	86
Хонгуруу	13,3	0,042	8,46	<0,001	<1	100
Холинское	31,9	0,109	7,58	<0,001	<1	100
Ягоднинское	25,3	0,068	8,14	0,002	16	84
Нор Кохб	20,1	0,073	4,72	<0,001	<1	100
Сокерницкое	14	0,053	4,89	<0,001	<1	100

Табл. 4. Величина удельной поверхности и распределение пор по размеру образцов цеолитов

Месторождение	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Сумма
Хотынецкое	12,3	18,7	40,2	7,2	78,4
Хонгуруу	73,8	7,4	89,8	31,1	202,1
Холинское	53,0	46,9	55,9	4,6	160,3
Ягоднинское	43,5	71,3	81	10,1	205,9
Нор Кохб	43,2	71,2	76,9	7,9	199,2
Сокерницкое	34,5	38,4	94,8	22,7	190,4

Табл. 5. Емкость катионного обмена образцов цеолитов, мг-экв/100 г

и Хотынецкого месторождений составила 160 и 78 мг-экв/100 г соответственно.

По составу обменных катионов выделяются преимущественно щелочные цеолиты, у которых преобладающее количество обменных катионов представлено калием и натрием, и щелочноземельные с преобладанием кальция и магния. К щелочным цеолитам относятся Ягоднинское, Нор Кохб и Холинское месторождения, причем у первых двух наблюдается преобладание катионов калия над натрием. К щелочноземельному типу относятся цеолиты месторождения Хонгуруу, а также Хотынецкого и Сокерницкого месторождений.

Стоит отметить, что при применении цеолитов в качестве сорбентов наиболее предпочтительными являются преимущественно щелочные разновидности, поскольку катионы натрия и калия являются более мобильными и легче замещаются при очистке растворов и газов.

Термические характеристики исследуемых образцов также являются типичными для цеолитовых пород. Выделяется два основных эндотермических пика (рис. 7). Эндозффект в пределах 100–110 °С связан с удалением поверхностной влаги и, частично, воды из пор цеолита. Эндозффект до 500 °С связан с удалением основного количества воды из каналов цеолита. Важно отметить, что некоторые цеолиты, например, клиноптилолит, имеют относительно высокую термоустойчивость, их кристаллическая решетка устойчива до 750–900 °С, далее происходит аморфизация минерала. Для цеолита месторождения Хонгуруу характерен отчетливый эндозффект в районе 357 °С, что связано с наличием гейландита в составе исследуемого образца (Foldvari, 2011). Термический эффект в районе 450–500 °С отмеченный в той или иной степени практически у всех образцов, может быть связан с примесью глинистых минералов, а именно смешанослойного иллит-сметита и иллита.

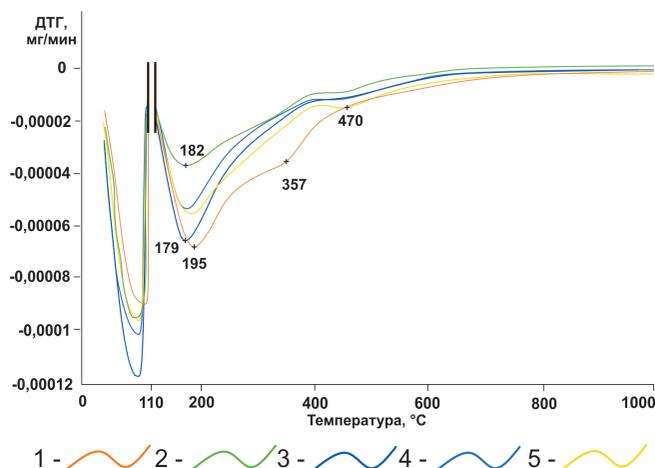


Рис. 7. Результаты термического анализа образцов цеолитов различных месторождений. 1 – Хонгуруу; 2 – Холинское; 3 – Ягоднинское; 4 – Нор Кохб; 5 – Сокерницкое

## Заключение

На территории России выявлено порядка 120 месторождений и проявлений цеолитов, однако государственным балансом учитываются всего 18 месторождений с запасами категории А+В+С<sub>1</sub> 594 млн т и С<sub>2</sub> 799 млн т. Добыча цеолитовых пород имеет незначительные масштабы, разрабатывается только Хотынецкое (Орловская область), Хонгуруу (Республика Саха), Холинское (Забайкальский край) и Чугуевское (Приморский край) месторождения с суммарной годовой добычей порядка 60–80 тыс. т. Выделяется пять цеолитоносных провинций: Центральная, Южная, Уральская, Сибирская и Дальневосточная. Практически весь добываемый материал идет на производство гигиенических подстилок животным, грунта для домашних растений, в качестве добавки в бетон и для производства пеностекла, тогда как использование цеолитов в высокотехнологических отраслях находится в стадии развития.

Цеолиты распространены повсеместно, встречаются как в виде примесей в месторождениях силицитов и карбонатных пород, где их содержание незначительно, так и образуют крупные месторождения высококачественного «вулканического» цеолита. К первому типу относятся цеолиты осадочного типа, в основном встречающиеся в пределах Русской и Западно-Сибирской плит и Сибирской платформы. Месторождения высококачественного «вулканического» цеолита представлены вулканогенно-осадочным и гидротермальными типами. Они напрямую связаны

с вулканической деятельностью, образуются по пепловому материалу, туфам и перлитам и приурочены в основном к Дальневосточному и Сибирскому регионам. В связи с особенностями образования для месторождений цеолита вулканогенного типа характерна пространственная связь с месторождениями перлитов, силицитов, бентонитов, каменных и бурых углей.

Несмотря на значительные запасы цеолитов на территории России, объемы его добычи остаются на весьма низком уровне. Учитывая степень освоения месторождений, качество сырья и удаленность от транспортных каналов, предложены наиболее перспективные объекты, заслуживающие внимания при постановке поисковых работ на высококачественные цеолиты.

Одним из наиболее перспективных регионов по количеству крупных объектов с вулканическими цеолитами является Забайкальский край. Из объектов, поставленных на баланс, стоит отметить Холинское месторождение. Оно находится в статусе разрабатываемого, однако добыча на месторождении не превышает 1–2 тыс. т в год. Учитывая крупные запасы, высокое качество сырья, а также наличие инфраструктуры, Холинское месторождение относится к категории наиболее перспективных объектов. Бадинское и Шивыртуйское месторождения довольно хорошо изучены и имеют высокое качество сырья, в связи с чем они заслуживают более детального внимания, возможного их доизучения и последующей отработки.

Цеолиты Чугуевского месторождения, расположенного в Приморском крае, отличаются высокими эксплуатационными свойствами.

Для Республики Бурятия также характерна высокая степень цеолитонности. В частности, сырье Мухорталинского месторождения относится к высококачественным цеолитам вулканического происхождения, а его относительная близость к ж/д путям делает его привлекательным объектом в экономическом плане.

Гидротермальные цеолиты Ягоднинского месторождения, расположенного в Камчатском крае, являются уникальными по своим свойствам, имеют преимущественно калиевый состав обменных катионов и обладают повышенными сорбционными свойствами, в связи с чем по праву могут быть отнесены к группе наиболее перспективных объектов. Однако разработка месторождения осложнена логистикой.

Несмотря на небольшие запасы Люльинское и Мысовское (ХМАО) месторождения можно отнести к перспективным, поскольку они обладают высоким качеством сырья и потенциалом в значительном приросте запасов при проведении дополнительных геологоразведочных работ.

Также к объектам, обладающим высоким потенциалом, можно отнести цеолитонную провинцию Магаданской области с прогнозными запасами цеолитов порядка 100 млн т, Приморского края, где цеолитонность приурочена к кислому вулканизму в пределах Восточно-Сихотэ-Алинского вулканического пояса, а также Кавказский регион, где имеются благоприятные геологические условия для образования цеолитов вулканического типа, и имеется развитая инфраструктура.

## Финансирование/Благодарности

Полевые работы на месторождении Хонгуруу, а также Ягоднинском и Хотынецком месторождениях проведены при финансовой поддержке Российского научного Фонда, проект №22-77-10050.

Аналитические работы по изучению образцов цеолитов проведены в рамках базовой темы ИГЕМ РАН.

Авторы выражают благодарность генеральному директору ООО «ЦеоТрейдРесурс» Степановой А.Г., генеральному директору «Стройиндустрия» Боброву В.В. и генеральному директору ООО «Сунтарцеолит» Попову П.М. за помощь в проведении полевых работ на месторождениях цеолитов (Хотынецкое, Ягоднинское и Хонгуруу), к.г.-м.н., в.н.с. ИГЕМ РАН Крупской В.В., к.т.н., доценту РХТУ Тюпиной Е.А. и к.х.н., с.н.с. ИГЕМ РАН Покидько Б.В. за помощь в проведении исследований, а также Нересову М.А. за предоставление образцов цеолитов Холинского месторождения.

Авторы выражают благодарность рецензентам за ценные советы, время и усилия, потраченные на рецензирование и правку статьи, что помогло улучшить статью.

## Литература

- Белицкий И.А., Фурсенко Б.А. (1992). Природные цеолиты России: Геология, физико-химические свойства и применение в промышленности и охране окружающей среды. Новосибирск: РАН, т. 1, Тез. Респуб. совещания «Природные цеолиты России», 25–27 ноября 1991 г., 171 с.
- Белоусов П.Е., Чупаленков Н.М., Карелина Н.Д., Крупская В.В. (2020). Геолого-структурная позиция месторождений бентонита и цеолита России. *Мат. конф.: «Породо-, минерало- и рудообразование: достижения и перспективы исследований»*. Москва: ИГЕМ, с. 826–829.
- Белоусов П.Е., Карелина Н.Д. (2022). Вулканогенно-осадочные и гидротермальные месторождения бентонитовой глины. *Вулканология и сейсмология*, 6, с. 63–75. DOI: 10.31857/S0203030622060025
- Белоусов П.Е., Карелина Н.Д., Морозов И.А., Рудмин М.А., Милютин В.В., Некрасова Н.А., Румянцева А.О., Крупская В.В. (2023). Особенности условий образования, минерального состава и сорбционных свойств цеолитсодержащего трепела Хотынецкого месторождения (Орловская обл.). *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, 334(5), с. 70–84. DOI 10.18799/24131830/2023/5/4001
- Белоусов П.Е., Румянцева А.О., Кайлачаков П.Э. (2024). Вулканические цеолиты Ягоднинского месторождения (Камчатский край). *Вулканология и сейсмология*, 3, с. 3–17. DOI: 10.31857/S0203030624030011
- Бушинский Г.И., Шуменко С.И. (1970). Уточненное определение цеолита из меловых отложений Брянска. *Литология и полезные ископаемые*, 6, с. 111–114.
- Буров А.И., Дистанов У.Г., Зайнуллин И.И., Конюхова Т.П., Михайлов А.С., Наседкин В.В., Пленкин А.П., Сабитов А.А. (1990). Природные сорбенты СССР. Москва: Недра, 208 с.
- Валиева И.Р., Нефедов В.А. (2011). Цеолиты приполярного и полярного Урала. *Наука и современность*.
- Васильянова Л.С., Лазарева Е.А. (2016). Цеолиты в экологии. *Новости науки Казахстана*, 1(127), с. 61–85.
- Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации: «Цеолиты» (2019). Москва: Росгеолфонд, 19 с.
- Гордиенко И.В., Жамойцина Л.Г. (1995). Мухорталинское перлитцеолитовое месторождение. М.: Геоинформмарк, т. 1, к. 2, с. 226–233.
- Дистанов У.Г., Аксенов Е.М., Сабитов А.А. и др. (2000). Фанерозойские осадочные палеобассейны России: проблемы эволюции и минерализации неметаллов. Москва: Геоинформатика, 399 с.
- Джрбашян Р.Т., Мнацаканян А.Х., Петросов И.Х. (1999). Главнейшие месторождения цеолитов Армении. Ереван: Издательство АН Армянской ССР, 190 с.
- Жабин А.В., Дмитриев Д.А. (2002). Аутигенное минералообразование в палеоценовых и верхнемеловых отложениях Воронежской антеклизы. *Вестник Воронежского ун-та. Геология*, 1, с. 84–94.

- Зонхоева Э.Л. (2018). Природные цеолиты Забайкалья: свойства и применение. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 192 с.
- Зорина С.О., Афанасьева Н.И., Волкова С.А. (2008). Цеолитонность верхнемеловых-палеогеновых осадочных пород востока и юго-востока русской плиты. *Литология и полезные ископаемые*, 6, с. 638–649.
- Колодезников К.Е., Новгородов П.Г., Матросова Т.В., Степанов В.В. (1992). Кемпендйский цеолитонный район. Якутск: ЯНЦ СО РАН, 68 с.
- Косовская А.Г. (1980). Природные цеолиты. М.: Наука. 224 с.
- Корецкий Д.С., Игнатова А.Ю. (2010). Изучение влияния цеолита Пегасского месторождения на рост растений. *Вестник КузГТУ*, 2(78), с. 92–95.
- Милотин В.В., Белоусов П.Е., Некрасова Н.А., Крупская В.В. (2023). Сорбция радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  на цеолитах различного генезиса. *Радиохимия*, 65(3), с. 285–292.
- Муравьев В.И., Воронин Б.И. (1979). Особенности состава цеолитов глауконитово-кремнистой формации и проблема классификации группы клиноптилолита-гейландита. *Литология и полезные ископаемые*, (2), с. 75–82.
- Муравьев В.И. (1983). Минеральные парагенезы глауконитово-кремнистых формаций. М.: Наука, 208 с.
- Муравьев В.И. (1987). Вопросы абиогенного осадочного кремнеакпления. *Происхождение и практическое использование кремнистых пород*. М.: Наука, с. 86–96.
- Наседкин В.В., Наседкина В.Х. (1980). Генетические и морфологические типы клиноптилолит-мordenитовой минерализации вулканических областей. *Природные цеолиты*. М.: Наука, с. 122–134.
- Наседкин В.В., Соловьева Т.Н., Магер А.В. и др. (1985). Отчет. Комплексное изучение сырьевой базы и физико-механических свойств вулканических пород (пемз, шлаков, туфов, перлитов) Дальнего Востока и Камчатки. М., 425 с.
- Наседкин В.В., Соловьева Т.Н., Нистратова И.Е. и др. (1988). Сравнительная характеристика минерального состава цеолитовых пород горы Ягодной и продуктов современного минералообразования долины р. Банной п-ова Камчатки. *Современные гидротермы и минералообразование*. М.: Наука, с. 70–85.
- Наседкин В.В., Ширинзаде Н.А. (2008). Даш-Салахлинское месторождение бентонита. Становление и перспективы развития. Москва: ГЕОС, 85 с.
- Нахабцев Ю.С., Корчагин В.П., Щербаков О.И. и др. (1975). Государственная геологическая карта масштаба 1:200 000, серия Нижневилуйская, Лист Р-50-ХVIII, ФГУП ВСЕГЕИ, Якутское геологическое управление.
- Николаев А.В., Петрова А.И., Разумов А.Н., и др. (1993). Отчет по результатам детальной разведки месторождения цеолитов Хонгуруу. ТКЗ N 417. Алмазы России-Саха АК.
- Петрова А.И., Старыгина Т.Т., Николаев А.В. (1993). Геологическая карта района работ. К отчету по результатам детальной разведки месторождения цеолитов Хонгуруу. Геолком РФ ЯРГЦ.
- Рогулина Л.И., Юрков В.В. (2006). Особенности минерального состава цеолитов Амурской области. *Литосфера*, 1, с. 149–157.
- Савко А.Д., Жабин А.В., Дмитриев Д.А. (2001). Морфология частиц цеолитов группы гейландита и минералов свободного кремнезема (на примере отложений Воронежской антеклизы). *Вестник Воронежского университета. Геология*, 12, с. 51–56.
- Савко А.Д., Дмитриев Д.А., Иванова Е.О., Чигарев А.Г. (2009). Литология и полезные ископаемые сантона центральной части КМА. Воронеж: Воронежский государственный университет, 108 с.
- Савко А.Д., Свиридов В.А. (2014). Геохимия литогенеза. *Мат. Российского сов. Сыктывкар*, с. 206–209.
- Савко А.Д., Дмитриев Д.А., Свиридов В.А. (2019). Цеолит – кремнистые коры выветривания на меловых породах Воронежской антеклизы. Фациальный анализ в литологии: теория и практика. *Сборник науч. Мат. Эколит*. М., с. 126–128.
- Савко А.Д., Иванова Е.О., Чигарев А.Г. (2019). Цеолиты в верхнемеловых отложениях Белгородской и Курской областей. *Сорбционные и хроматографические процессы*, 10(3), с. 433–439.
- Сафронов А. Ф., Колодезников К. Е., Уаров В. Ф. (2004). Полезные ископаемые Сунтарского района и перспективы их промышленного освоения. Якутск: ЯФ ГУ «Изд-во СО РАН», с. 49–57.
- Семенов В.П., Асочинский Б.В., Селезнев В.Н. (1974). Размещение, генезис и возможности использования кремнистых пород верхнего мела Воронежской антеклизы. *Сырьевая база кремнистых пород СССР*. Москва: Наука, с. 36–40.
- Сеньковский Ю.Н. (1977). Литогенез кремнистых толщ юго-запада СССР. Киев: Наукова Думка, 127 с.
- Сеньковский Ю.Н. (1980). Кремнеакпление в мелу на континентальной окраине тектонической части Европейского блока. *Осадочные породы и руды*. Киев: Наукова Думка, с. 174–182.
- Склярова Г.Ф. (2021). Цеолиты – нетрадиционный многоцелевой вид агрохимического сырья на территории Дальнего Востока. *Известия вузов. Горный журнал*, 5, с. 36–44.
- Сляднев В.И., Хасанов Ш.Г., Крикун Н.Ф. (2006). Государственная геологическая карта масштаба 1:1000000 лист N-57, ФГУП ВСЕГЕИ, ФГУП Камчатгеологии.
- Смирнов П.В., Константинов А.О. (2016). Сравнительные исследования эоценовых и палеоценовых диатомитов Зауралья (на примере Камышловского месторождения и разреза Брусаяна). *Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов*, 327(11), с. 96–104.
- Смирнов П.В., Константинов А.О. (2017). Биогенное кремнеакпление в Западно-Сибирском морском бассейне в палеоцено-эоцено: факторы и стадии. *Литосфера*, 17(4), с. 26–47. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2017-4-026-047>
- Хардинов А.Э., Бойко Н.И., Агарков Ю.В. (2000). О цеолитах юга России. *Доклады Академии Наук*, 371(5), с. 666–670.
- Чекрыжов И.Ю., Попов В.К. (2001). Цеолиты Приморья: генезис и минералогическо-геохимические характеристики. *Успехи наук о жизни*, 1, с. 82–96.
- Юсупов А.Р., Мамаев С.А., Юсупов З.А., Мамаев А.С. (2021). Исследование цеолитосодержащих кремнистых пород Дагестана для получения минеральной добавки в цемент. *Вестник геонаук*, 10(322), с. 42–46. <https://doi.org/10.19110/geov.2021.10.5>
- Christidis G.E. (2011). Advances in the Characterization of Industrial Minerals. *European Mineralogical Union Notes in Mineralogy*, v. 9. <https://doi.org/10.1180/emu-notes.2010.emu9>
- Foldvari M. (2011). Handbook of thermogravimetric system of minerals and its use in geological practice. Budapest: Geol. inst. of Hungary, 180 p.
- Gadore V., Mishra R. S., Yadav N., Yadav G., Ahmaruzzaman Md. (2024). Advances in zeolite-based materials for dye removal: Current trends and future prospects. *Inorganic Chemistry Communications*, 66, 112606. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.112606>
- Kordala N., Wyszowski M. Zeolite properties, methods of synthesis, and selected applications. (2024). *Molecules*, 29, 1069. <https://doi.org/10.3390/molecules29051069>
- Marantos I., Christidis G.G., Ulmanu M. (2011). Zeolite formation and deposits. *Handbook of Natural Zeolites*, pp. 19–36. <https://doi.org/10.2174/978160805261511201010028>
- Ming D. W., Boettinger J.L. (2001). Zeolites in soil environmental. Berlin, Boston: De Gruyter, pp. 323–346. <https://doi.org/10.2138/rmg.2001.45.11>

## Сведения об авторах

**Петр Евгеньевич Белоусов** – кандидат геол.-минерал. наук, старший научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН

Россия, 119017, Москва, Старомонетный пер., д. 35  
e-mail: pitbl@mail.ru

**Платон Эдуардович Кайлачаков** – кандидат геол.-минерал. наук, научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН; старший преподаватель, Российский университет дружбы народов

Россия, 119017, Москва, Старомонетный пер., д. 35  
e-mail: kplaton@yandex.ru

**Анастасия Олеговна Румянцева** – младший научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН

Россия, 119017, Москва, Старомонетный пер., д. 35  
e-mail: rummyantseva.anastasia2017@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 28.02.2024;  
Принята к публикации 02.05.2024;  
Опубликована 20.12.2024

## Zeolite Mineral Resource Base of Russia

P.E. Belousov<sup>1\*</sup>, P.E. Kailachakov<sup>1,2</sup>, A.O. Rumyantseva<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup>Peoples' Friendship University of Russia - RUDN University, Moscow, Russian Federation

\*Corresponding author: Petr E. Belousov, e-mail: pitbl@mail.ru

**Abstract.** The main zeolite deposits in Russia and the other CIS nations are considered, large zeolite provinces are identified, and the most promising territories for expanding the mineral resource base of the Russian Federation are determined. Information on the reserves of deposits, the degree of their exploitation, and production rates is provided. The influence of formation conditions, composition and type of the parent material, on the color and textural-structural features of zeolites is established. The features of geological structure and composition of sedimentary, volcanogenic-sedimentary, and hydrothermal zeolite deposits are considered. A comparative analysis of zeolites from the most important industrial deposits in Russia and the CIS is given, characterizing their mineral and chemical compositions, thermal properties, volume of cation exchange capacity and specific surface area. This work is the result of the authors' own geological field work on various zeolite deposits in Russia and the CIS, as well as a summary of previously published materials.

**Keywords:** zeolites, clinoptilolite, industrial raw materials, sorbents, mineral resource base

**Recommended citation:** Belousov P.E., Kailachakov P.E., Rumyantseva A.O. (2024). Zeolite Mineral Resource Base of Russia. *Georesursy = Georesources*, 26(4), pp. 260–274. <https://doi.org/10.18599/grs.2024.4.12>

### Acknowledgements

Field work at the Honguruu, Yagodninskoe and Khotyneukom deposits, was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation, project No. 22-77-10050.

Analytical work on the study of zeolite samples was carried out within the framework of the basic theme of IGEM RAS.

The authors express their gratitude to A.G. Stepanova the Director of ZeoTradeResurs LLC, V.V. Bobrov the Director of Stroyindustriya LLC. and P.M. Popov Director of Suntarzeolite LLC for their assistance in carrying out field trips at zeolite deposits (Khotynets, Yagodninskoe and Honguruu), as well as Dr. V.V. Krupskaya (IGEM RAS), Dr. E.A. Tyupina (RHTU RAS), Dr. B.V. Pokidko (IGEM RAS) for assistance in conducting research, and M.A. Nersesov for providing samples of zeolites from the Kholinskoe deposit.

### References

Belitsky I.A., Fursenko B.A. (1992). Natural zeolites of Russia: Geology, physical and chemical properties and application in industry and environmental protection. Novosibirsk: RAS, vol. 1, *Proc. Republic meeting "Natural zeolites of Russia"*, November 25–27, 1991, 171 p. (In Russ.)  
Belousov P.E., Chupalenkov N.M., Karelina N.D., Krupskaya V.V. (2020). Geological and structural position of bentonite and zeolite deposits in Russia. *Proc. Conf.: Rock, Mineral and Ore Formation: Achievements and Prospects of Research*. Moscow: IGEM, pp. 826–829. (In Russ.)

Belousov P.E., Karelina N.D. (2022). Volcano-Sedimentary and Hydrothermal Bentonite Deposits. *Journal of Volcanology and Seismology*, 16(6), pp. 451–461. DOI: 10.1134/S0742046322060021

Belousov P.E., Karelina N.D., Morozov I.A., Rudmin M.A., Milyutin V.V., Nekrasova N.A., Rumyantseva A.O., Krupskaya V.V. (2023). Zeolite-containing tripoli of khotynets deposit (Orel region): mineral composition, sorption properties and formation conditions. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 334(5), pp. 70–84. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2023/5/4001

Belousov P.E., Rumyantseva A.O., Kailachakov P.E. (2024). Volcanic Zeolites at the Yagodninskoe Deposit, Kamchatka. *Journal of Volcanology and Seismology*, 18(3), pp. 201–212. DOI: 10.1134/S0742046324700611

Bushinsky G.I., Shumenko S.I. (1970). Refined definition of zeolite from chalk deposits of Bryansk. *Litologiya i poleznye iskopaemye = Lithology and mineral resources*, 6, pp. 111–114. (In Russ.)

Burov A.I., Distanov U.G., Zainullin I.I., Konyukhova T.P., Mikhailov A.S., Nasedkin V.V., Plenkin A.P., Sabitov A.A. (1990). Natural sorbents of the USSR. Moscow: Nedra, 208 p. (In Russ.)

Chekryzhov I.Yu., Popov V.K. (2001). Zeolites of Primorye: genesis and mineralogical-geochemical characteristic. *Uspekhi nauk o zhizni*, 1, pp. 82–96. (In Russ.)

Christidis G.E. (2011). Advances in the Characterization of Industrial Minerals. *European Mineralogical Union Notes in Mineralogy*, v. 9. <https://doi.org/10.1180/emu-notes.2010.emu9>

Distanov U.G., Aksenov E.M., Sabitov A.A. et al. (2000). Phanerozoic sedimentary paleobasins of Russia: problems of evolution and minerageny of non-metals. Moscow: Geoinformatika, 399 p. (In Russ.)

Foldvari M. (2011). Handbook of thermogravimetric system of minerals and its use in geological practice. Budapest: Geol. inst. of Hungary, 180 p.

Gadore V., Mishra R. S., Yadav N., Yadav G., Ahmaruzzaman M.D. (2024). Advances in zeolite-based materials for dye removal: Current trends and future prospects. *Inorganic Chemistry Communications*, 66, 112606. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.112606>.

Gordienko I.V., Zhamoysina L.G. (1995). Mukhortalinskoye perlite-zeolite deposit. Moscow: Geoinformmark, v. 1, b. 2, pp. 226–233. (In Russ.)

Jrbashyan R.T., Mnatsakanyan A.Kh., Petrosov I.Kh. (1999). The main deposits of zeolites in Armenia. Yerevan: Academy of Sciences of the Armenian SSR, 190 p. (In Russ.)

Khardikov A.E., Boiko N.I., Agarkov Yu.V. (2000). Zeolites of southern Russia. *Doklady Earth Sciences*, 371(5), pp. 469–472. (In Russ.)

Kolodeznikov K.E., Novgorodov P.G., Matrosova T.V., Stepanov V.V. (1992). Kempendyai zeolite-bearing region. Yakutsk: YaNTs SO RAN, 68 p. (In Russ.)

Kossovskaya A.G. (1980). Natural zeolites. Moscow: Nauka, 224 p. (In Russ.)

Kordala N., Wyszowski M. Zeolite properties, methods of synthesis, and selected applications. (2024). *Molecules*, 29, 1069. <https://doi.org/10.3390/molecules29051069>

Koretsky D.S., Ignatova A.Yu. (2010). Study of the influence of zeolite from the Pegasus deposit on plant growth. *Vestnik KuzGTU*, 2(78), pp. 92–95. (In Russ.)

Marantos I., Christidis G.G., Ulmanu M. (2011). Zeolite formation and deposits. *Handbook of Natural Zeolites*, pp. 19–36. <https://doi.org/10.2174/978160805261511201010028>

Milyutin V.V., Belousov P.E., Nekrasova N.A., Krupskaya V.V. (2023). Sorption of radionuclides 137Cs and 90Sr on zeolites of various genesis. *Radiochemistry*, 65(3), pp. 346–353. DOI: 10.1134/S1066362223030104

Ming D. W., Boettlinger J.L. (2001). Zeolites in soil environmental. Berlin, Boston: De Gruyter, pp. 323–346. <https://doi.org/10.2138/rmg.2001.45.11>

Muravyov V.I., Voronin B.I. (1979). Features of the composition of zeolites of the glauconite-siliceous formation and the problem of classifying

the clinoptilolite-heulandite group. *Litologiya i poleznye iskopaemye = Lithology and mineral resources*, 2, pp. 75–82. (In Russ.)

Muravyov V.I. (1983). Mineral parageneses of glauconite-siliceous formations. Moscow: Nauka, 208 p. (In Russ.)

Muravyov V.I. (1987). Issues of abiogenic sedimentary silica accumulation. Origin and practical use of siliceous rocks. Moscow: Nauka, pp. 86–96. (In Russ.)

Nasedkin V.V., Nasedkina V.Kh. (1980). Genetic and morphological types of clinoptilolite-mordenite mineralization in volcanic areas. *Natural zeolites*. Moscow: Nauka, pp. 122–134. (In Russ.)

Nasedkin V.V., Solovyova T.N., Mager A.V. et al. (1985). Report. A comprehensive study of the raw material base and physical and mechanical properties of volcanic rocks (pumice, slag, tuff, perlite) of the Far East and Kamchatka. Moscow, 425 p. (In Russ.)

Nasedkin V.V., Solovyova T.N., Nistratova I.E. et al (1988). Comparative characteristics of the mineral composition of zeolite rocks from Mount Yagodnaya and the products of modern mineral formation in the valley of the river. Bannaya Peninsula Kamchatka. Modern hydrotherms and mineral formation. Moscow: Nauka, pp. 70–85. (In Russ.)

Nasedkin V.V., Shirinzade N.A. (2008). Dash-Salakhinskoe bentonite deposit. Formation and development prospects. Moscow: GEOS, 85 p. (In Russ.)

Nakhabtsev Yu.S., Korchagin V.P., Shcherbakov O.I. et al. (1975) State geological map at a scale of 1:200,000, Nizhnevilyuyskaya series, Sheet P-50-XVIII, FSUE VSEGEI, Yakutsk Geological Department.

Nikolaev A.V., Petrova A.I., Razumov A.N., et al. (1993). Report on the results of detailed exploration of the Honguruu zeolite deposit. TKZ N 417. Diamonds of Russia-Sakha AK.

Petrova A.I., Starygina T.T., Nikolaev A.V. (1993). Geological map of the work area. To the report on the results of detailed exploration of the Honguruu zeolite deposit. (In Russ.)

Rogulina L.I., Yurkov V.V. (2006). Features of the mineral composition of zeolites in the Amur region. *LITHOSPHERE (Russia)*, 1, pp. 149–157. (In Russ.)

Savko A.D., Zhabin A.V., Dmitriev D.A. (2001). Morphology of particles of zeolites of the heulandite group and free silica minerals (using the example of sediments of the Voronezh anticline). *Vestnik Voronezhskogo universiteta. Geologiya*, 12, pp. 51–56. (In Russ.)

Savko A.D., Dmitriev D.A., Ivanova E.O., Chigarev A.G. (2009). Lithology and minerals of the Santonian of the central part of the KMA. Voronezh: Voronezhskiy gosudarstvennyy universitet, 108 p. (In Russ.)

Savko A.D., Sviridov V.A. (2014). Geochemistry of lithogenesis. *Proc. All-Russian Meet. Syktyvkar*, pp. 206–209. (In Russ.)

Savko A.D., Dmitriev D.A., Sviridov V.A. (2019). Zeolite – siliceous weathering crusts on chalk rocks of the Voronezh anticline. Facies analysis in lithology: theory and practice. *Ekzolit*. Moscow, pp. 126–128. (In Russ.)

Savko A.D., Ivanova E.O., Chigarev A.G. (2019). Zeolites in the Upper Cretaceous deposits of the Belgorod and Kursk regions. *Sorbtionnye I Khromatograficheskie Protsesty*, 10(3), pp. 433–439. (In Russ.)

Safronov A. F., Kolodeznikov K. E., Uarov V. F. (2004). Mineral resources of the Suntar region and prospects for their industrial development. Yakutsk: Izd-vo SO RAN, pp. 49–57. (In Russ.)

Semenov V.P., Askochinsky B.V., Seleznev V.N. (1974). Location, genesis and possibilities of using siliceous rocks of the Upper Cretaceous of the Voronezh anticline. *Raw material base of siliceous rocks of the USSR*. Moscow: Nauka, pp. 36–40. (In Russ.)

Senkovsky Yu.N. (1977). Lithogenesis of siliceous strata in the southwest of the USSR. Kyiv: Naukova Dumka, 127 p. (In Russ.)

Senkovsky Yu.N. (1980). Silicon accumulation in the Cretaceous on the continental margin of the Tethys part of the European block. *Sedimentary rocks and ores*. Kiev: Naukova Dumka, pp. 174–182. (In Russ.)

Sklyarova G.F. (2021). Zeolites - an unconventional multi-purpose type of agrochemical raw materials in the Far East. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeni. Gornyi zhurnal*, 5, pp. 36–44. (In Russ.)

Slyadnev V.I., Khasanov Sh.G., Krikun N.F. (2006). State geological map of scale 1:1000000 sheet N-57, VSEGEI, Kamchatgeologiya. (In Russ.)

Smirnov P.V., Konstantinov A.O. (2016). Comparative studies of Eocene and Paleocene diatomites of the Trans-Urals (using the example of the Kamyshlovskoye deposit and the Brusyan section). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 327(11), pp. 96–104. (In Russ.)

Smirnov P.V., Konstantinov A.O. (2017). Biogenic siliceous accumulation in Early Paleogene marine basins of Western Siberia: Factors and stages. *LITHOSPHERE (Russia)*, 17(4), pp. 26–47. (In Russ.)

State balance of mineral reserves of the Russian Federation: “Zeolites” (2019). Moscow: Rosgeolfond, 19 p. (In Russ.)

Valieva I.R., Nefedov V.A. (2011). Zeolites of the subpolar and polar Urals. *Nauka i sovremennost*. (In Russ.)

Vasilyanova L. S., Lazareva E. A. (2016). Zeolites in ecology. *Novosti nauki Kazakhstana*, 1(127), pp. 61–85. (In Russ.)

Yusupov A.R., Mamaev S.A., Yusupov Z.A., Mamaev A.S. (2021). Study of zeolite-containing siliceous rocks of Dagestan to obtain a mineral additive for cement. *Vestnik of Geosciences*, 10(322), pp. 42–46. (In Russ.) <https://doi.org/10.19110/geov.2021.10.5>

Zhabin A.V., Dmitriev D.A. (2002). Authigenic mineral formation in Paleocene and Upper Cretaceous deposits of the Voronezh anticline. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 1, pp. 84–94. (In Russ.)

Zonkhoeva E.L. (2018). Natural zeolites of Transbaikalia: properties and application. Ulan-Ude: BSC SB RAS, 192 p. (In Russ.)

Zorina S.O., Afanas'eva N.I., Volkova S.A. (2008). Zeolite potential of upper cretaceous-paleogene sedimentary rocks in the eastern and southeastern Russian plate. *Lithology and Mineral Resources*, 43(6), pp. 577–587. <https://doi.org/10.1134/S0024490208060059>

### About the Authors

*Petr E. Belousov* – Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Senior Researcher, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences

35 Staromonetny lane, Moscow, 119017, Russian Federation  
Work phone: e-mail: pitbl@mail.ru

*Platon E. Kailachakov* – Cand. Sci. (Geology and Mineralogy) Researcher, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences; Senior Lecturer, Peoples' Friendship University of Russia - RUDN University

35 Staromonetny lane, Moscow, 119017, Russian Federation  
e-mail: kplaton@yandex.ru

*Anastasia O. Rumyantseva* – Junior Research, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences

35 Staromonetny lane, Moscow, 119017, Russian Federation  
e-mail: rumyantseva.anastasia2017@yandex.ru

*Manuscript received 28 February 2024;  
Accepted 2 May 2024; Published 20 December 2024*

© 2024 The Authors. This article is published in open access under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)