

УДК 552.55

## МИНЕРАЛОГО-ХИМИЧЕСКИЕ И СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ОПОКОВИДНЫХ ОПАЛ-КРИСТОБАЛИТОВЫХ ПОРОД КАК СЫРЬЯ ДЛЯ СТРОЙИНДУСТРИИ

Котляр Владимир Дмитриевич<sup>1</sup>,  
diatomit\_kvd@mail.ru

Терёхина Юлия Викторовна<sup>1</sup>,  
yuliya-2209@mail.ru

<sup>1</sup> Донской государственный технический университет,  
Россия, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью освоения и вовлечения опокovidных опал-кристобалитовых пород и их переходных разновидностей в производство строительных материалов различного назначения в регионах распространения данных пород – центральные районы России, Поволжье, Западная Сибирь, Северный Кавказ.

**Цель:** разработать критерии и методики оценки опокovidных опал-кристобалитовых пород при геологических работах для определения наиболее перспективных направлений их использования в производстве строительных материалов.

**Объекты:** разведанные месторождения и крупные проявления опокovidных опал-кристобалитовых пород, которые при геологических работах были оценены узконаправленно и в настоящее время не разрабатываются или не используются в производстве строительных материалов и изделий.

**Методы:** методики определения физико-механических свойств горных пород; методика количественного химического анализа горных пород, рентгенофазовые исследования, электронно-зондовые исследования, обеспечивающие возможность проведения элементного анализа в диапазоне от Na до U; методики проведения технологических испытаний по соответствующим технологиям производства строительных материалов и изделий. Расшифровка дифрактограмм проводилась с использованием соответствующих методик путем сопоставления с подобными исследованиями, а также с использованием международных баз данных.

**Результаты.** Разработана классификация опокovidных опал-кристобалитовых пород по химическому и минеральному составу как сырья для получения различных видов строительных материалов. Выделено четыре основных классификационных критерия: содержание кремнезёма в виде опала, содержание кремнезёма в виде кварца, содержание оксида алюминия и оксида кальция. Выделено шесть видов опокovidных опал-кристобалитовых пород: опоки кремнезёмные, опоки классические, опоки песчанистые, опоки глинистые, опоки карбонатные и опоки глинисто-карбонатные. Разработанная классификация позволяет на основе данных по химико-минералогическому составу опокovidных опал-кристобалитовых пород дать конкретные рекомендации по их использованию для производства определённых видов строительных материалов и прогнозировать их свойства.

### Ключевые слова:

опока, опокovidные опал-кристобалитовые породы, строительные материалы, химический состав, минеральный состав, опал, опал-кристобалит, исследование, методика, классификация.

### Введение

Опокovidные опал-кристобалитовые породы представлены обширными запасами в Центральном, Приволжском, Сибирском, Южном и Северо-Кавказском округах России. Характерной их особенностью, в отличие от других осадочных пород, является наличие аморфного кремнезёма в виде опала или опал-кристобалита и микропористая структура [1–5]. От диатомитов и трепелов опоки отличаются более плотной структурой, повышенной прочностью, а также тем, что они не размокают в воде в естественном виде. Для получения на основе опок пластичной массы их необходимо тонко измельчить (менее 1 мм) или механически активировать.

Опокovidные породы – это обширная группа пород с весьма разнообразным составом. Если говорить о «классических» опоках, которые содержат в своём составе небольшое количество глинистых и терригенных минералов, то они являются породами с максимальным содержанием опалового кремнезёма, от которых наблюдаются постепенные переходы: к глинистым породам – через глинистые опоки; к карбонатным породам – через карбонатные опоки; к песчанникам – через песчанистые опоки, содержащие в сво-

ём составе повышенное количество кварца алевритово-псаммитовой размерности. Поэтому, имея в виду камневидные микропористые неразмокаемые в воде породы, содержащие в своём составе опаловый кремнезём в том или ином количестве, правильно говорить опокovidные породы с соответствующим прилагательным (глинистые, карбонатные, песчанистые), а под «классическими», «нормальными», «чистыми» опоками следует понимать породы, состоящие из опалового кремнезёма с небольшим количеством глинистых минералов (до 20 %) и терригенных минералов (до 15 %).

Направления использования опокovidных пород, как и диатомитов и трепелов, довольно разнообразны, и каждая отрасль промышленности предъявляет свои требования к качественным характеристикам сырья (рис. 1).

Производство строительных материалов и изделий является одним из наиболее ёмких, экономически выгодных и значимых для промышленности и развития страны направлений в стройиндустрии. Отечественный и зарубежный опыт, а также наши работы в этом направлении с учётом анализа текущего состояния промышленности строительных материалов в России

позволили выделить наиболее перспективные направления использования опоквидных пород для производства строительных материалов, представленные на рис. 2 [6–12]. Прежде всего, это производство различных видов вяжущих веществ, производство широкой номенклатуры изделий строительной керамики, а также различных видов заполнителей для бетонов, сухих строительных смесей и добавок.

Однако, перед тем, как быть вовлеченной в различные виды промышленности, каждая сырьевая база, в т. ч. и опоквидные опал-кristобалитовые породы, проходит несколько стадий геологической и научной изученности, а также промышленную апробацию.

В современных экономических реалиях вышеперечисленные этапы проводятся точно, за счет частного капитала и представителей бизнеса, заинтересованных в расширении сырьевой базы для производства конкретной продукции в условиях либо действующих предприятий, либо проектируемых, с четкими требованиями к показателям качества исходного сырья.

На самой первой стадии – геологического изучения проявлений и перспективных участков опоквидных опал-кristобалитовых пород – важным моментом является выбор показателей качества породы и методик их оценки с целью установления пригодности сырья для дальнейшего использования.

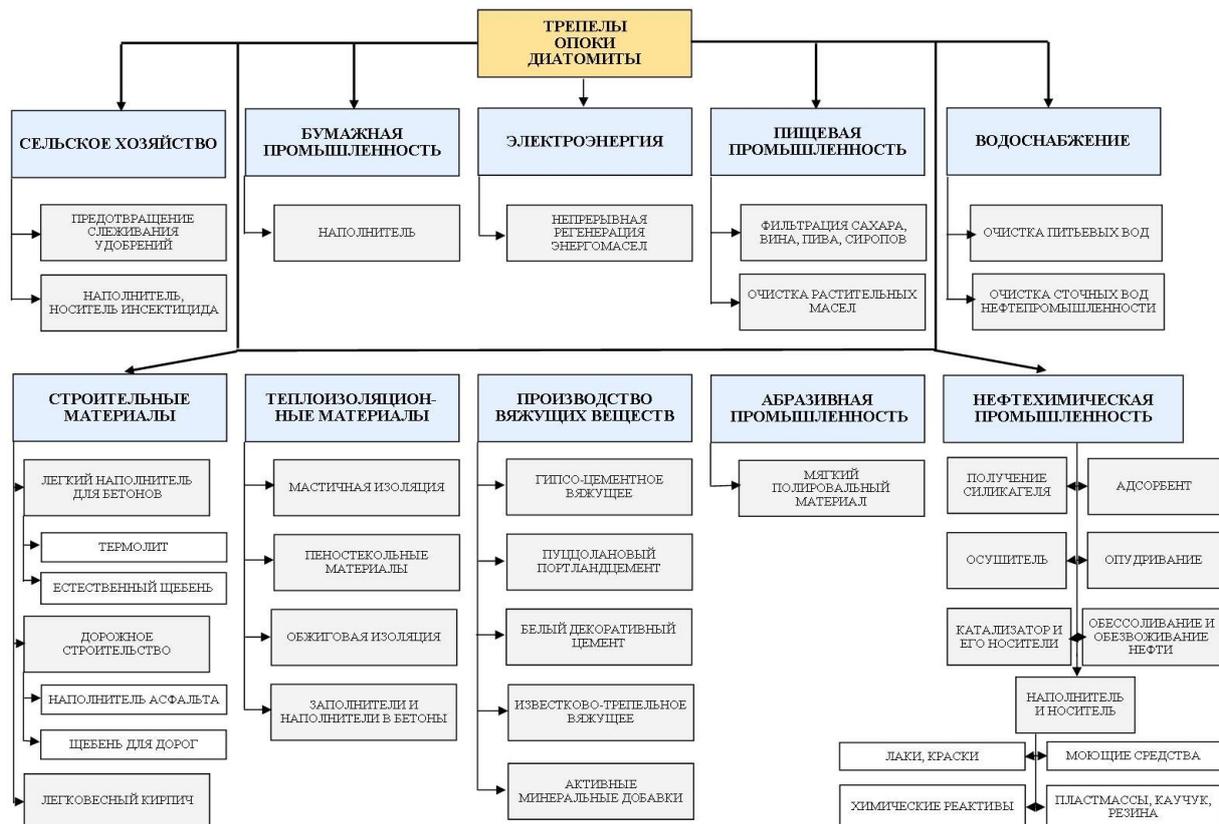


Рис. 1. Основные направления использования опал-кristобалитовых пород

Fig. 1. Main directions of using opal-cristobalite rocks

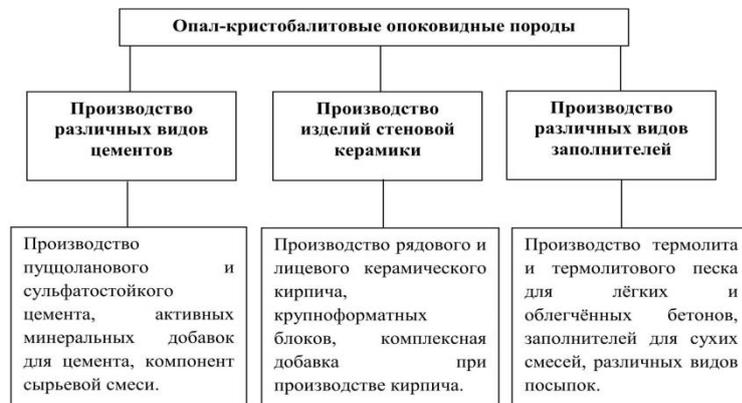


Рис. 2. Перспективные направления использования опоквидных опал-кristобалитовых пород в производстве строительных материалов

Fig. 2. Promising directions for the use of opokamorphic opal-cristobalite rocks in the production of building materials

Основным документом, которым руководствуются геологи при оценке опал-кristобалитовых пород, являются «Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Кремниевые породы» [4]. Данный рекомендательный документ прописывает четкие критерии по классификации месторождений кремнистых опал-кristобалитовых пород, но даёт лишь в общем виде рекомендации по их оценке и применению. Это закономерно, так как оценить и провести исследования на пригодность данного сырья для всех направлений использования, представленных на рис. 1, является слишком трудоёмкой задачей с учётом того, что каждая отрасль предъявляет свои специфические требования к сырью.

Особенностью законодательства РФ в вопросах недропользования по состоянию на 2022 г. при выдаче лицензий на изучение и разработку нерудных полезных ископаемых является то, что к подсчёту запасов в обязательном порядке необходимо принимать и вскрышные породы, которые также должны находить свое применение. Опоквидные опал-кristобалитовые породы часто находятся в ассоциации с известняками, глинами, песками, песчаниками и другими породами, при изучении, разведке и добыче которых опоквидные породы являются внешней или внутренней вскрышей, и у геологов возникает проблема по нахождению области их применения. При этом надо иметь в виду, что основной целью ранее проведенных геологических работ являлся поиск и разведка «чистых» опок, диатомитов и трепелов. Переходные разновидности, глинистые, карбонатные и песчаные опоки, которые имеют в природе гораздо более широкое распространение, оставались без внимания и просто характеризовались как горная масса. Между тем, переходные разновидности весьма ценны и имеют широкие перспективы для использования как в строительстве, так и в

различных областях промышленности, представленные на рис. 1. Уже на стадии геологического изучения месторождений чистых и переходных разновидностей опоквидных опал-кristобалитовых пород необходимы четкие критерии для определения наиболее перспективных направлений их использования.

Свойства и показатели качества горной породы, как известно, определяются её химико-минеральным составом и структурно-текстурными особенностями, изучение данных показателей является обязательным при геологических работах для рядовых и лабораторно-технологических проб. На основании наших многочисленных исследований, анализа работ ученых, занимающихся изучением опоквидных пород, нами предлагается классификация опоквидных пород по химическому, минеральному составу и структурным характеристикам применительно к использованию в стройиндустрии как наиболее материалоемкой отрасли, не имеющей географических ограничений.

#### Материалы и методы исследования

Пробы опоквидных опал-кristобалитовых пород для проведения исследования отбирались непосредственно авторами статьи на известных месторождениях и крупных проявлениях юга и центральной части России, Урала, Поволжья и Западной Сибири.

Основные методы исследования, приборы и оборудование, применяемые в данной работе, представлены на схеме исследований (рис. 3). Приборы и испытательное оборудование поверены и аттестованы в установленном порядке.

Расшифровка дифрактограмм проводилась с использованием соответствующих методик, путем сопоставления с подобными исследованиями, а также с использованием международных баз данных. Интерпретация полученных результатов выполнялась с использованием соответствующих методик.



Рис. 3. Методы исследования опоквидных опал-кristобалитовых пород  
 Fig. 3. Methods for studying opokamorphic opal-cristobalite rocks

### Результаты и их обсуждение

Изучение химического состава опоквидных пород показало, что они обладают достаточно разнообразным химическим составом. Принципиальных различий в химическом составе между ними и кислым

глинистым сырьём, к которому в основном относятся различные виды суглинков, нет (табл. 1). Также химический состав опоквидных пород близок к кислым магматическим породам – гранитоидам.

Таблица 1. Усреднённый химический состав опоквидных пород и суглинков, масс. %

Table 1. Average chemical composition of opokamorphic rocks and loams, wt. %

Породы Rocks	ППП loss on ignition	SiO <sub>2</sub> общ./опал. total/opal	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub> общ./total	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
Опоквидные породы Opokamorphic rocks	2–22	51–85/ 20–70	4–15	1–6	0,5–25,0	0,1–3,0	0,1–1,0	0,5–3,0	0,1–2,0
Суглинки/Loams	4–18	50–75	6–16	1–9	1–24	0,1–3	0,1–2	1–4	0,5–3,5

Химический состав тесно связан с минеральным составом. Увеличение или уменьшение содержания SiO<sub>2</sub> говорит об увеличении или уменьшении содержания опалового кремнезёма или кремнезёма в виде кварца. Увеличение содержания кварца всегда сопровождается увеличением средней плотности породы (плотность с учётом пор), и такие опоки называют песчанистыми. К сожалению, определить количество кремнезёма в виде кварца в опоквидных породах по методике оценки глинистого сырья по ГОСТ 21216-2014 «Сырье глинистое. Методы испытаний», п. 5.8 «Определение кварца – свободного диоксида кремния» достаточно затруднительно, так как «метод основан на выделении нерастворимого диоксида кремния с использованием горячей ортофосфорной кислоты и последующем прокаливании его до постоянной массы» [13], и в этом случае не растворяется в ортофосфорной кислоте опаловый кремнезём. Данный метод должен дополняться определением опалового кремнезёма по ГОСТ 8269.0-97 «Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний», п. 4.22 «Определение реакционной способности горной породы и щебня (гравия)» [14]. Метод основан на растворении опалового кремнезёма в щелочах, и в частности в гидроксиде натрия.

Содержание оксида алюминия, а также оксидов калия и натрия говорит о присутствии глинистых минералов, и прежде всего гидрослюд. Содержание оксида алюминия в гидрослюдах составляет около 35 %, содержание оксида калия – около 10 %. Присутствие оксида натрия говорит о присутствии минералов из группы монтмориллонита или, что встречается гораздо чаще, смешанослойных минералов.

Содержание оксида кальция, как и магния, в количестве 1–2 % обусловлено его вхождением в состав некоторых глинистых минералов, увеличение больше этого количества говорит о наличии в составе опоквидных пород кальцита, который обычно присутствует в виде тонкодисперсных зёрен – менее 0,1 мм. Увеличение содержания кальцита говорит о переходе к карбонатным опокам и далее к известнякам. В карбонатных опоках содержание кальцита может достигать 40 %.

Оксиды железа в небольшом количестве входят в состав глинистых минералов, но в основном в опоквидных породах наблюдаются в виде гидроксидов и, в меньшей мере, оксидов. Оксиды серы говорят о

присутствии гипса и в меньшей мере сульфидов железа. Оксиды фосфора, титана, марганца входят в состав опоквидных пород в небольшом количестве и не оказывают особого влияния на технологические свойства и свойства получаемых изделий. Основными оксидами, по которым можно судить о конкретной опоквидной породе, являются: оксид кремния, разделённый на кварцевый и опаловый кремнезём, оксид алюминия и оксид кальция. В табл. 2 приведена условная укрупнённая классификация опоквидных пород, исходя из содержания вышеуказанных компонентов.

Таблица 2. Укрупнённая классификация опоквидных пород по химическому составу

Table 2. Enlarged classification of opokamorphic rocks by chemical composition

Группа Group	Тип опоквидных пород Facies of opokamorphic rocks	Содержание компонентов, масс. % Content of components, wt. %			
		Опаловый Opal SiO <sub>2</sub>	Кварцевый Silica SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO
1	Окремнелые Silicified	80–90	0,1–10	2–5	0,1–3
2	Классические Classical	60–80	10–20	5–10	0,1–3
3	Песчанистые/Sandy	30–60	20–40	2–10	0,1–3
4	Глинистые/Clay	30–60	0,1–20	10–15	0,1–3
5	Карбонатные Carbonate	40–80	0,1–20	2–10	3–30
6	Глинисто-карбонатные Clay-carbonate	30–60	0,1–10	10–15	3–20

Нижняя граница содержания кварцевого кремнезёма и оксида кальция в данной классификации принята в количестве 0,1 %, так как данные оксиды всегда присутствуют в опоквидных породах в большем количестве. Содержание оксида алюминия в количестве более 15 % говорит о переходе глинистой опоки к опоквидным глинам, которые помимо других отличительных признаков характеризуются размокаемостью в воде. Содержание оксида кальция в количестве более 30 % говорит о переходе опоки к опоквидным (кремнистым) известнякам. Часто в природе встречаются смешанные породы – опоки глинисто-карбонатные. При преобладании глинистого компонента такие породы классифицируются как глины, при преобладании карбонатного компонента – как известняки.

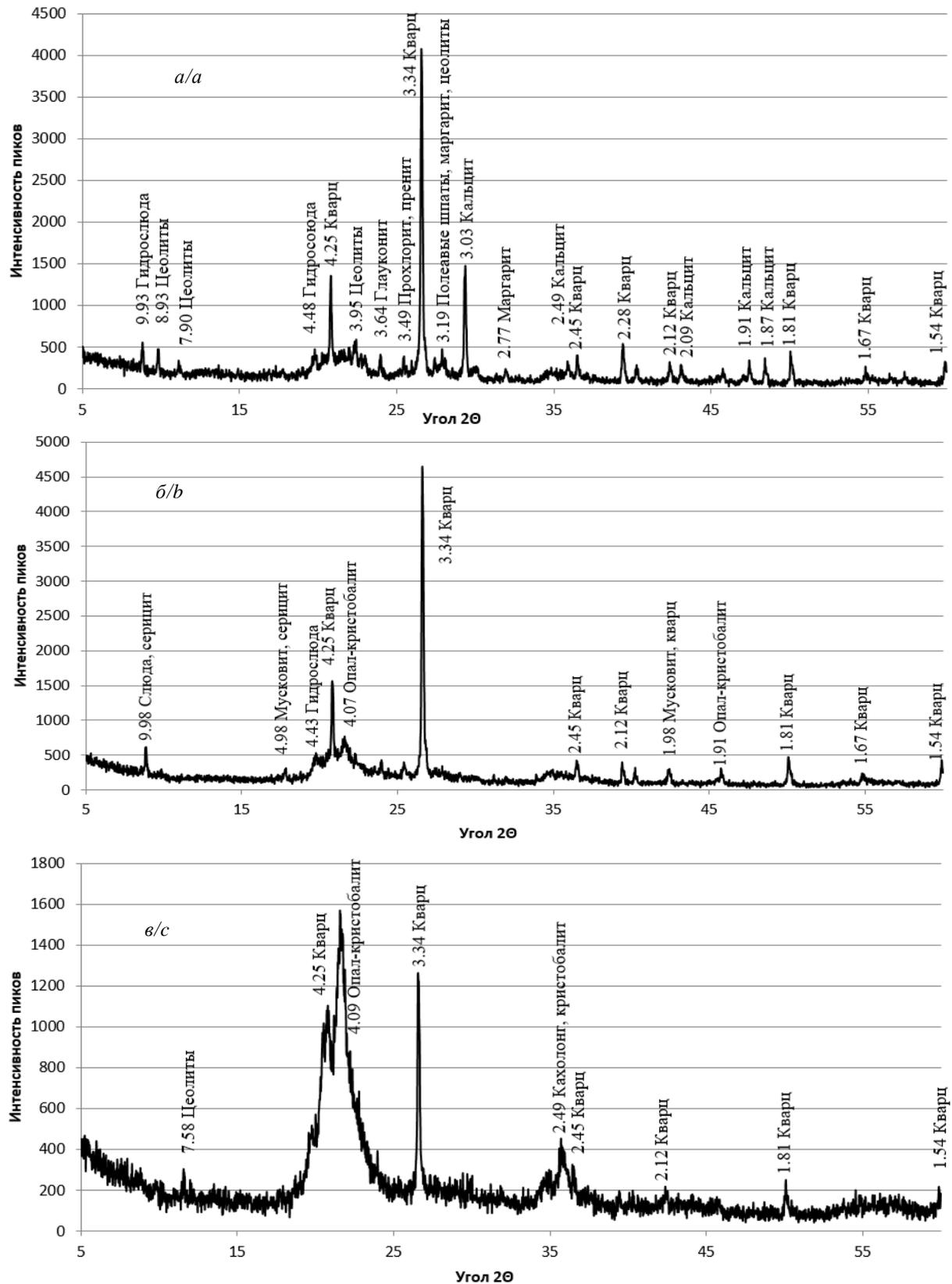


Рис. 4. Рентгенограммы опоки: а) Журавское месторождение; б) Карпово-Обрывское месторождение; в) Каменноярское месторождение

Fig. 4. X-ray gaize: a) Zhuravskoe field; b) Karpovo-Obryvskoe field; c) Kamennyarskoe field

В минеральном составе опалокристаллитных пород можно выделить две особенности. Во-первых, опаловый кремнезём может иметь различную степень кристалличности. Он может присутствовать в виде рентгеноаморфной разновидности или, по общепринятой классификации Джонса и Сеньи, опала-А – «сильно неупорядоченной, почти аморфной фазой, с ограниченным дальним порядком», или представлен опалокристаллитом, по классификации Джонса и Сеньи, опалом-К. Переходной разновидностью между опалом-А и опалом-К является своеобразная фаза кремнезёма – тридимит-кристаллитный опал (опал-КТ), который имеет смешанослоистую структуру. Исследователи, изучающие кремнистые породы, отмечают различную степень структурной упорядоченности опала-К и опала-КТ [15–22]. На рентгенограммах опалокристаллитных пород степень кристалличности опалового кремнезёма чётко проявляется (рис. 4). О наличии опала говорит широкое гало в области углов  $20\text{--}25^\circ 2\theta$ . О наличии опалокристаллита говорит пик  $4,05\text{--}4,09 \text{ \AA}$ , и чем выше и острее данный пик, тем выше степень кристалличности опалового кремнезёма и тем выше степень его перехода к кристаллиту.

Во-вторых, для опалокристаллитных пород характерным для глинистой составляющей является наличие гидрослюд и смешанослойных минералов. В кремнистых глинах или сильноглинистых опоках отмечается присутствие монтмориллонита. Гидрослюдистые и слюдяные минералы характерны для фракции  $2\text{--}10 \text{ мкм}$ , смешанослойные минералы – для более тонкодисперсных фракций. Также характерным для опалокристаллитных пород, особенно карбонатных, является присутствие цеолитов. Часто встречаются глауконит и минералы группы хлорита. Данный набор глинистых минералов наряду с опаловым кремнезёмом предполагает начало спекания сырьевых керамических масс на основе опалокристаллитных пород при невысоких температурах.

Микроструктура опалокристаллитных пород может быть охарактеризована как алевро-пелитовая или органо-алевро-пелитовая. Опаловый кремнезём представлен глобулами, чешуйками, а также остатками панцирей микроорганизмов – диатомей, радиолярий, губок. Слюды и гидрослюды в основном представлены игольчатыми и таблитчатыми кристаллами (рис. 5). Алевроитовый материал – в виде неокатанных и полукатанных зёрен кварца, округлых зёрен глауконита. Смешанослойные минералы и монтмориллонит представлены тонкочешуйчатыми образованиями. В карбонатных разновидностях опалокристаллитных пород кальцит представлен в виде остатков фораминифер и вторичных микрокристалликов.

Некоторые разновидности опалокристаллитных пород характеризуются неяснослоистой текстурой, в которой отдельные весьма тонкие слои обогащены глинистым материалом. Эффективный диаметр пор у опалокристаллитных пород составляет от  $4 \text{ до } 12 \text{ нм}$  при удельной поверхности от  $50 \text{ до } 130 \text{ м}^2/\text{г}$ .

За счёт мелкопористой структуры с высоким водопоглощением нетрещиноватые опалокристаллитные породы являются достаточно морозостойкими и могут ис-

пользоваться как стеновой камень или как различные заполнители. На рис. 6 приведена фотография церкви иконы Божией Матери «Одигитрия» в хуторе Карпово-Обрывский Ростовской области, сложенная из карбонатных опок. Данное строение находится без крыши более 70 лет, сохраняя при этом свою целостность.

Ориентируясь на химический и минеральный состав опалокристаллитных пород, изучение которых является обязательным при геологических работах, можно с высокой степенью достоверности предполагать наиболее перспективные области их применения в качестве сырья для получения различных видов строительных материалов. В табл. 3 на основе обобщения ранее проведённых и наших исследований приведены перспективные направления использования различных видов опалокристаллитных опалокристаллитных пород в строительной отрасли в зависимости от отнесения к выделенным типам.

На основе многочисленных исследований нами установлено, что в технологическом плане отличительной особенностью опалокристаллитных опалокристаллитных пород как сырья для производства изделий стеновой керамики является зависимость технологических свойств от степени их измельчения. Так, чем более тонко измельчена исходная порода, тем выше её пластичность, лучше формоустойчивость сырьевых масс, выше прочность обожжённых изделий, выше активность опалового кремнезёма и т. д. [6, 7, 9]. Это обусловлено тем, что глинистые минералы и цеолиты, входящие в состав опалокристаллитных пород, находятся в прочном контакте с опаловым кремнезёмом и не проявляют своих свойств. При измельчении глинистые минералы высвобождаются и начинают проявлять свои пластические свойства. Поэтому для достижения необходимой пластичности и формоустойчивости необходимо измельчать породу до определённой степени.

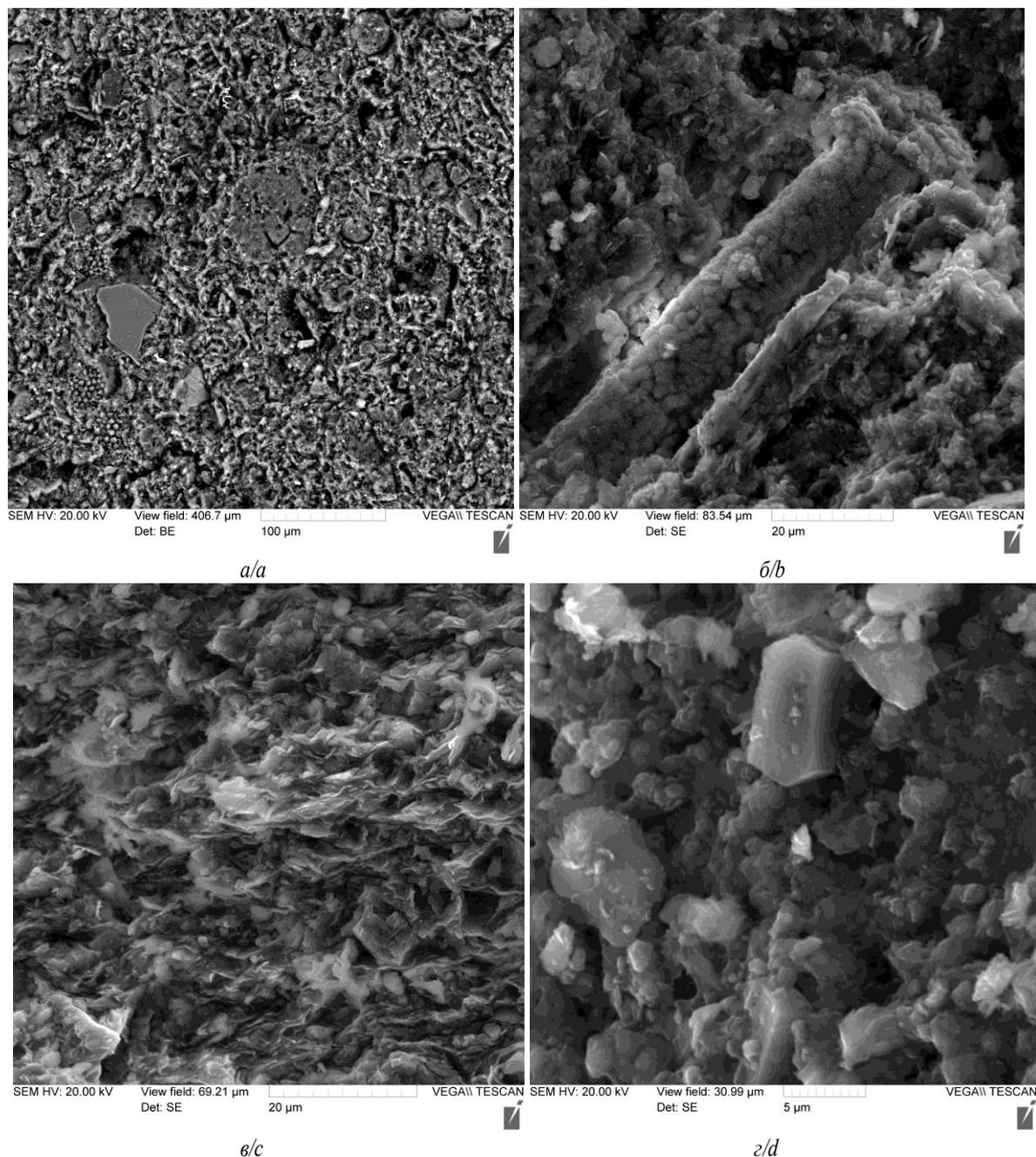
При испытаниях опалокристаллитных пород для стеновой керамики, на основе практического опыта, нами рекомендуется измельчать исходное сырьё до фракции  $0\text{--}0,5 \text{ мм}$  и менее. Опилки глинистые можно измельчать до фракции  $0\text{--}1 \text{ мм}$ . При этом хорошие результаты даёт вылеживание сырьевых смесей во влажном состоянии. Технологии подготовки сырья и формовки изделий могут осуществляться как пластическим способом, так и полусухим, при котором подготовка сырья заключается в полусухом измельчении, а формование изделий осуществляется из порошкообразных масс. В производстве керамических материалов выделенные группы пород могут применяться и как основное сырьё, и как добавочный компонент для улучшения технологических свойств сырья или показателей качества готовой продукции.

Как крупный и мелкий заполнитель для бетонов и смесей рекомендуемые группы могут быть использованы как в природном, но измельченном состоянии до необходимых фракций, так и в обожженном виде – термомлит.

Опалокристаллитные породы также являются ценным сырьём для производства различных вяжущих веществ,

теплоизоляционных материалов, пеностекольных материалов при определении данными отраслями тре-

бований к качеству сырья и методик его подтверждения.



**Рис. 5.** Микрофотографии опалокристаллитовых пород под электронным микроскопом: а) листочки слюды, остатки диатомей, зёрна глауконита и кварца в классических опоках; б) остатки спикул губок, покрытые глобулярным опалом в глинисто-карбонатных опоках; в) хлопьевидные агрегаты опалового кремнезёма в карбонатных опоках; г) зёрна кварца, глауконита, пелитоморфного кальцита, гидрослюд в глинисто-карбонатных опоках

**Fig. 5.** Micrographs of opal-cristobalite rocks under a visible microscope: a) mica leaves, remains of diatoms, grains of glauconite and quartz in classical opoka; б) remains of sponge spicules covered with globular opal in clay-carbonate opoka; c) flake aggregates of opal silica in carbonate opoka; d) grains of quartz, glauconite, pelitomorphous calcite, hydromica in clay-carbonate opoka



**Рис. 6.** Разрушенная церковь иконы Божией Матери «Одигитрия» в Ростовской области, сложенная блоками из карбонатных опок

**Fig. 6.** Ruined church of the icon of the Mother of God «Hodegetria» in the Rostov region, built of blocks of carbonate gneiss

**Таблица 3.** Перспективные области применения опокосидных опал-кристобалитовых пород в строительстве  
**Table 3.** Promising areas of application of opokomorphic opal-cristobalite rocks in construction

Тип опокосидных пород Facies of opokomorphic rocks	Особенности технологических свойств Features of technological properties	Перспективные области применения Promising applications
Опоки кремнеземные Silicified gneiss	Прочность – до 30–50 МПа, прочные. Не размокают в воде. Не пластичны даже при тонком измельчении Strength – up to 30–50 MPa, strong. Do not swell on wetting. Not plastic even when finely milling	Как крупный и мелкий заполнитель, посыпки в природном и модифицированном виде As coarse and fine aggregate, sprinkles in natural and modified form
Опоки классические Classical gneiss	Прочность – до 5–10 МПа, малопрочные. Размокают в воде при измельчении. Умеренно пластичны Strength – up to 5–10 MPa, low-strength. Swell on wetting during milling. Moderately plastic	Как крупный и мелкий заполнитель в модифицированном виде. Для получения легковесных стеновых керамических изделий. Как добавка к цементам, растворам и бетонам As coarse and fine aggregate in modified form. For production of lightweight wall ceramic articles. As an additive to cements, mortars and concretes
Опоки песчаные Sandy gneiss	Прочность – до 20–30 МПа, прочные. Не размокают в воде. Не пластичны даже при тонком измельчении Strength – up to 20–30 MPa, strong. Do not swell on wetting. Not plastic even when finely milling	Как крупный и мелкий заполнитель, посыпки в природном и модифицированном виде As coarse and fine aggregate, sprinkles in natural and modified form
Опоки глинистые Clay gneiss	Прочность – до 5–10 МПа, малопрочные. Медленно размокают в воде. Умеренно- и среднепластичные при тонком измельчении Strength – up to 5–10 MPa, low-strength. Slowly swell on wetting. Moderate and medium plastic with fine milling	Для получения различных видов стеновой керамики. В модифицированном виде как добавка к цементам, растворам и бетонам For the production of various types of wall ceramics. In modified form as an additive to cements, mortars and concretes
Опоки карбонатные Carbonate gneiss	Прочность – до 15–20 МПа, среднеточные. Не размокают в воде. Малопластичны при тонком измельчении Strength – up to 15–20 MPa, medium strength. Do not swell on wetting. Low plastic with fine milling	Как компонент сырьевой смеси для получения лицевого керамического кирпича светлой окраски. Для получения синтетического волластонита. Как добавка к цементам, растворам и бетонам As a component of the raw material mixture for producing a light-colored face ceramic brick. To obtain synthetic wollastonite. As an additive to cements, mortars and concretes
Опоки глинисто-карбонатные Clay-carbonate gneiss	Прочность – до 5–10 МПа, малопрочные. Медленно размокают в воде. Умеренно- и среднепластичные при тонком измельчении Strength – up to 5–10 MPa, low-strength. Slowly swell on wetting. Moderate and medium plastic with fine milling	Для получения лицевого керамического кирпича светлой окраски и других изделий стеновой керамики. Как крупный и мелкий заполнитель в модифицированном виде For the production of face ceramic bricks of light color and other products of wall ceramics. As coarse and fine aggregate in modified form

## Заключение

Результаты проведённых исследований позволили классифицировать опоквидные породы по химическому и минеральному составу в качестве сырья для получения различных видов строительных материалов. Классификационными критериями определено содержание опалового кремнезёма, кварцевого кремнезёма, оксида алюминия и оксида кальция. Количество данных оксидов определяет особенности минерального состава, структурные особенности и физико-механические свойства породы. Выделено шесть типов опоквидных пород, между которыми наблюдаются плавные переходы: опоки кремнеземные; опоки классические; опоки песчаные; опоки глинистые; опоки карбонатные; опоки глинисто-карбонатные. Для каждого типа приведены перспективные области применения в строительстве – раз-

личные виды изделий стеновой керамики, различные виды вяжущих веществ, различные виды заполнителей. Комплексный подход позволит при геологических работах не просто констатировать состав опоквидных пород, а давать конкретные рекомендации по их использованию. Также, зная потребности того или иного региона России в сырьевой базе для производства различных групп строительных материалов, можно проводить целенаправленные геологические работы на поиск и оценку определённых видов опоквидных пород. Учитывая вышеизложенное, результаты работ, ресурсы и распространённость опоквидных пород в России, важным на наш взгляд является разработка общепринятых для геологов и технологов методик оценки свойств и испытаний опоквидных пород для получения тех или иных видов строительных материалов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дистанов У.Г. Кремнистые породы СССР. – Казань: Татарское книжное издательство, 1976. – 411 с.
2. Jones J.B., Segnit E.R. The nature of opal I. nomenclature and constituent phases // *Journal of the Geological Society of Australia*. – 1971. – V. 18:1. – P. 57–68. DOI: 10.1080/00167617108728743
3. The Report of China Mineral Resource Exploration, 2018 // *China Geology*. – 2019. – V. 2. – P. 248–250. DOI: 10.31035/cg2018101
4. Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Кремниевые породы. – М., 2007. – 37 с.
5. Дистанов У.Г. Минеральное сырье. Опал-кристаллитовые породы. Справочник. – М.: ЗАО «Геонформарк», 1998. – 27 с.
6. Paving clinker of low-temperature sintering on the basis of orokamorphic rocks / V.D. Kotlyar, G.A. Kozlov, O.I. Zhivotkov, K.A. Lapunova // *Materials and Technologies in Construction and Architecture*. Materials Science Forum Submitted. – 2018. – V. 931. – P. 568–572.
7. Особенности производства лицевого керамического кирпича мягкой формовки на основе опоквидных пород / В.Д. Котляр, Н.И. Небежко, Ю.А. Божко, Х.С. Явруян // *Строительные материалы*. – 2019. – № 12. – С. 18–23.
8. Malolepszy J., Stepień P. The influence of gaize addition on sulphate corrosion of CEM III/A and CEM II/B cements // *Procedia Engineering*. – 2015. – V. 108. – P. 270–276. DOI: doi.org/10.1016/j.proeng.2015.06.147
9. Dynamic mineralogical and structural transformations in the process of siliceous opal clays firing / K.A. Lapunova, Yu.A. Bozhko, Ya.V. Lazareva, M.E. Orlova, G.A. Kozlov // *Dynamics of Technical Systems: AIP Conference Proceedings*. XV International Scientific-Technical Conference. – 2019. – С. 060006.
10. Study of raw materials with the aim of obtaining ceramic filler and heat-insulating and structural wall ceramics / S.A. Montaeve, N.B. Adilova, N.S. Montaeve, K.Zh. Dosov, A.A. Taudaeva // *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD)*. – 2019. – V. 9. – Iss. 5. – P. 1057–1064.
11. Darweesh H.N.M. Building materials from siliceous clay and low grade dolomite rocks // *Ceramics International*. – 2001. – V. 27 (1). – P. 45–50.
12. Aitcin P.-C. Supplementary cementitious materials and blended cements // *Science and Technology of Concrete Admixtures*. – 2016. – P. 53–73. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100693-1.00004-7> (дата обращения: 15.09.2022).
13. ГОСТ 21216-2014. Сырье глинистое. Методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2015. – 40 с.
14. ГОСТ 8269.0-97. Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний. – М.: Стандартинформ, 2018. – 51 с.
15. Fröhlich F. The opal-CT nanostructure // *Journal of Non-Crystalline Solids*. – 2020. – V. 533. – P. 119938. DOI: doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2020.119938
16. Исследование процессов де- и регидратации поверхности опал-кристаллитовых пород методом в высоко температурной ИК-спектроскопии / Е.В. Морозкина, А.И. Матерн, В.Н. Рычков, Е.Ю. Яковлев // *Аналитика и контроль*. – 2003. – № 1. – С. 17–21.
17. Hukuo K., Hikichi Y. Composition and some properties of opal-CT rocks from the Camanosawa Formation of Tertiary age Aomori Prefecture // *Siliceous Deposits Pacific Region*. – Amsterdam, 1983. – P. 380–391.
18. Плюснина И.И., Васильева Е.Р. Модификационные превращения кремнезема и их диагностика в месторождениях различного генезиса. – Вест. МГУ. Геология. – 1983. – № 5. – С. 50–54.
19. Смирнов П.В. Фазовые переходы кремнезема в опал-кристаллитовых породах как фактор качества кремнистого сырья // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2017. – Т. 328. – № 9. – С. 6–15.
20. Jones B., Renaut R.W. Microstructural changes accompanying the opal-A to opal-CT transformation: new evidence from the siliceous sinters of Geysir, Haukadalur, Iceland // *Sedimentology*. – 2007. – V. 54. – № 4. – P. 921–949.
21. Warne S.St. J. The detection and identification of the silica minerals quartz, chalcedony, agate and opal, by differential thermal analysis. // *Inst. Fuel*. – 1970. – V. 43. – № 354. – P. 240–242.
22. De Master D.J. The diagenesis of biogenic silica: chemical transformations occurring in the water column, seabed, and crust (second edition) // *Treatise on Geochemistry*. – 2014. – № 9. – P. 103–111.

Поступила: 28.09.2022 г.

Дата рецензирования: 26.10.2022 г.

## Информация об авторах

**Котляр В.Д.**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительных материалов Донского государственного технического университета.

**Терёхина Ю.В.**, старший преподаватель кафедры строительных материалов Донского государственного технического университета.

UDC 552.55

## MINERAL-CHEMICAL AND STRUCTURAL FEATURES OF OPOKAMORPHIC OPAL-CRISTOBALITE ROCKS AS RAW MATERIAL FOR THE CONSTRUCTION INDUSTRY

Vladimir D. Kotlyar<sup>1</sup>,  
diatomit\_kvd@mail.ru

Yuliya V. Terekhina<sup>1</sup>,  
yuliya-2209@mail.ru

<sup>1</sup> Don State Technical University,  
1, Gagarin square, Rostov-on-Don, 344003, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the need to develop and involve opokamorphic opal-cristobalite rocks and their transitional varieties in the production of building materials for various purposes in the regions of distribution of these rocks – the central regions of Russia, the Volga region, Western Siberia, the North Caucasus.

**The main aim** of the research is to develop criteria and methods for the assessment of opokamorphic opal-cristobalite rocks during geological work to determine the most promising directions of their use in the production of construction materials.

**Objects:** explored deposits and large manifestations of opokamorphic opal-cristobalite rocks, which during geological work were evaluated narrowly and are not currently being developed or used in the production of construction materials and products.

**Methods:** methods for determination of physical and mechanical properties of rocks; method of quantitative chemical analysis of rocks, X-ray phase studies, electron probe studies providing the possibility of elemental analysis in the range from Na to U; methods for carrying out technological tests according to the relevant technologies for the production of building materials and products. Decoding of diffractograms was carried out using appropriate methods, by comparison with such studies, as well as using international databases.

**Results.** The authors have developed the classification of opokamorphic opal-cristobalite rocks by chemical and mineral composition as raw materials for the production of various types of building materials. There are four main classification criteria: the content of silica in the form of opal, the content of silica in the form of quartz, the content of aluminum oxide and calcium oxide. Six types of opokamorphic opal-cristobalite rocks were identified: silicified gaize, classical gaize, sandy gaize, clay gaize, carbonate gaize and clay-carbonate gaize. The developed classification allows, based on the data on the chemical and mineralogical composition of opokamorphic opal-cristobalite rocks, giving specific recommendations on their use for the production of certain types of building materials and predicting their properties.

### Key words:

gaize, opokamorphic, opal-cristobalite rocks, building materials, chemical composition, mineral composition, opal, opal-cristobalite, research, methodology, classification.

### REFERENCES

1. Distanov U.G. *Kremnistyye porody SSSR* [Siliceous rocks of the USSR]. Kazan, Tatar Book Publ. house, 1976. 411 p.
2. Jones J.B., Segnit E.R. The nature of opal I. nomenclature and constituent phases. *Journal of the Geological Society of Australia*, 1971, vol. 18:1, pp. 57–68. DOI: 10.1080/00167617108728743
3. The report of china mineral resource exploration, 2018. *China Geology*, 2019, vol. 2, pp. 248–250. DOI: 10.31035/cg2018101
4. *Metodicheskie rekomendatsii po primeneniyu Klassifikatsii zapasov mestorozhdeniy i prognoznykh resursov tverdykh poleznykh iskopaemykh. Kremniyevye porody* [Guidelines for the use of the classification of reserves of deposits and forecast resources of solid minerals. Silicon rocks]. Moscow, 2007. 37 p.
5. Distanov U.G. *Mineralnoe syre. Opal-kristobalitovye porody. Spravochnik* [Mineral raw materials. Opal-Cristobalite Rocks. Reference book]. Moscow, ZAO Geoinformark Publ., 1998. 27 p.
6. Kotlyar V.D., Kozlov G.A., Zhivotkov O.I., Lapunova K.A. Paving clinker of low-temperature sintering on the basis of opokamorphic rocks. *Materials and Technologies in Construction and Architecture. Materials Science Forum Submitted*, 2018, vol. 931, pp. 568–572.
7. Kotlyar V.D., Nebezsko N.I., Bozhko J.A., Yavruyan H.S. Features of the production of face ceramic brick of soft molding based on spade-shaped rocks. *Construction materials*, 2019, vol. 12, pp. 18–23.
8. Malolepszy J., Stepień P. The influence of gaize addition on sulphate corrosion of CEM II/A and CEM II/B cements. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 108, pp. 270–276. DOI: doi.org/10.1016/i.proeng.2015.06.147
9. Lapunova K.A., Bozhko Yu.A., Lazareva Ya.V., Orlova M.E., Kozlov G.A. Dynamic mineralogical and structural transformations in the process of siliceous opal clays firing. *AIP Conference Proceedings. XV International Scientific-Technical Conference. Dynamics of Technical Systems*. 2019. pp. 060006.
10. Montaeve S.A., Adilova N.B., Montaeve N.S., Dosov K.Zh., Taudaeva A.A. Study of raw materials with the aim of obtaining ceramic filler and heat-insulating and structural wall ceramics. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD)*, 2019, vol. 9, Iss. 5, pp. 1057–1064.
11. Darweesh H.H.M. Building materials from siliceous clay and low grade dolomite rocks. *Ceramics International*, 2001, vol. 27 (1), pp. 45–50.
12. Aïtcin P.-C. Supplementary cementitious materials and blended cements. *Science and Technology of Concrete Admixtures*, 2016, pp. 53–73. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100693-1.00004-7> (accessed 15 September 2022).
13. GOST 21216-2014. *Syre glinistoe. Metody ispytaniy* [State Standard 21216-2014. Clay material. Test Methods]. Moscow, StandardInform Publ., 2015. 40 p.
14. GOST 8269.0-97. *Shheben i graviy iz plotnykh gornyykh porod i otkhodov promyshlennogo proizvodstva dlya stroitelnykh rabot. Metody fiziko-mekhanicheskikh ispytaniy* [State Standard 8269.0-97. Crushed stone and gravel from dense rocks and industrial waste for construction work. Methods of physical and mechanical tests]. Moscow, StandardInform Publ., 2018. 51 p.
15. Fröhlich F. The opal-CT nanostructure. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2020, vol. 533, 119938. DOI: doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2020.119938
16. Morozkina E.V., Matern A.I., Rychkov V.N., Yakovlev E.Yu. Issledovanie protsessov de- i regidratatsii poverhnosti opal-kristobalitovykh porod metodom vysokotemperaturnoy IK-spektroskopii [The surface silica rock research using high temperature IR Spectroscopy]. *Analiitika i kontrol*, 2003, vol. 1, pp. 17–21.
17. Hukuo K., Hikichi Y. Composition and some properties of opal-CT rocks from the Camanosawa Formation of Tertiary age

- Aomori Prefecture. *Siliceous Deposits Pacific Region*. Amsterdam, 1983. pp. 380–391.
18. Plyusnina I.I., Vasilyeva E.R. Modifikatsionnye prevrashcheniya kremnezema i ikh diagnostika v mestorozhdeniyakh razlichnogo genezisa [Modification transformations of silica and their diagnostics in deposits of various genesis]. *West. MSU Geology*, 1983, vol. 5, pp. 50–54.
  19. Smirnov P.V. Fazovye perekhody kremnezema v opal-kristobalitovykh porodakh kak faktor kachestva kremnistogo syrya [Phase transitions of silica in opal-cristobalite rocks as a factor in the quality of siliceous raw materials]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 9, pp. 6–15.
  20. Jones B., Renaut R.W. Microstructural changes accompanying the opal-A to opal-CT transformation: new evidence from the siliceous sinters of Geysir, Haukadalur, Iceland. *Sedimentology*, 2007, vol. 54, no. 4, pp. 921–949.
  21. Warne S.St. J. The detection and identification of the silica minerals quartz, chalcedony, agate and opal, by differential thermal analysis. *Inst. Fuel*, 1970, vol. 43, no. 354, pp. 240–242.
  22. De Master D.J. The diagenesis of biogenic silica: chemical transformations occurring in the water column, seabed, and crust (second edition). *Treatise on Geochemistry*, 2014, vol. 9, pp. 103–111.

Received: 28 September 2022.

Reviewed: 26 October 2022.

#### Information about the authors

**Vladimir D. Kotlyar**, Dr. Sc., professor, Head of Construction materials Department, Don State Technical University.

**Yuliya V. Terekhina**, lecturer, Don State Technical University.