



ВЫВЕТРЕННЫЕ КВАРЦИТОПЕСЧАНИКИ КУРСКОЙ МАГНИТНОЙ АНОМАЛИИ – СЫРЬЕ СТРОЙИНДУСТРИИ

В. С. Лесовик^{1,2}, Е. В. Фомина^{*1,2}, И. А. Черепанова¹, А. Н. Ряпухин¹

¹Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова,
г. Белгород, Россия

²Центральный научно-исследовательский и проектный институт Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации,
г. Москва, Россия

naukavs@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2378-3947>

fomina.katerina@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-0542-0963>

inst703@intbel, <http://orcid.org/0000-0003-2590-8755.ru>

ryapukhin.an@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-6935-8452>

^{*}ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. Обсуждаются особенности состава и строения кварцитопесчаников Курской магнитной аномалии, затронутых процессами выветривания, которые не удовлетворяют требованиям нормативных документов для получения щебня. Запасы этих пород не были утверждены как полезные ископаемые и по настоящее время складываются в виде многотоннажных отвалов на территории комбината. Основная задача, определяемая в рамках работы, направлена на решение вопроса расширения сырьевой базы строительной отрасли.

Материалы и методы. Оценка эффективности использования выветренного кварцитопесчаника основана на исследовании показателей физико-химических свойств. Анализ минеральных пород проводился с применением цифровой микроскопии, метода рентгенофазового анализа. Проведены экспериментальные исследования кинетики помола сырья. Активность композиционных вяжущих с применением выветренного кварцитопесчаника изучали в соответствии с ГОСТ 30744–2001.

Результаты. Показано, что генетические особенности выветренных кварцитопесчаников обусловлены дефектной кристаллической структурой кварца, также они отличаются низкой морозостойкостью и прочностью. Эффективность помола выветренного кварцитопесчаника в 4 раза выше в сравнении с невыветренным. Установлено, что применение этого сырья для получения композиционных вяжущих позволяет сократить долю портландцемента в смеси до 50% и повысить прочность композиционного вяжущего на 20%.

Обсуждение и заключение. С учетом современных тенденций перехода строительной отрасли на многокомпонентные составы выветренный кварцитопесчаник целесообразно применять в качестве нетрадиционного кварцевого сырья при получении энергоэффективных строительных композитов нового поколения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: выветренный кварцитопесчаник, техногенное сырье, энергоэффективность, геоника (геомиметика), ресурсосбережение, экология.

Исследование выполнено в рамках Плана фундаментальных научных исследований Минстроя России и РААСН, тема 3.1.2.6., гранта РНФ № 22-19-20115, <https://rscf.ru/project/22-19-20115/> и Правительства Белгородской области, Соглашение №3 от 24.03.2022.

Статья поступила в редакцию 26.07.2022; одобрена после рецензирования 29.09.2022; принята к публикации 14.10.2022.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Лесовик В. С., Фомина Е. В., Черепанова И. А., Ряпухин А. Н. Выветренные кварцитопесчаники Курской магнитной аномалии – сырье стройиндустрии // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 5 (87). С. 728-737. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-728-737>

© Лесовик В. С., Фомина Е. В., Черепанова И. А., Ряпухин А. Н., 2022



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-728-737>
EDN: RRVNRN

WEATHERED QUARTITE SANDSTONES OF THE KURSK MAGNETIC ANOMALY AS A RAW MATERIAL FOR CONSTRUCTION INDUSTRY

Valery S. Lesovik^{1,2}, Ekaterina V. Fomina^{1,2}, Irina A. Cherepanova¹, Alexander N. Ryapukhin¹

¹ Shoukhov Belgorod State Technological University, Belgorod, Russia

²Central Research and Design Institute of the Ministry for Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation, Moscow, Russia

naukavs@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2378-3947>
fomina.katerina@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-0542-0963>
inst703@intbel, <http://orcid.org/0000-0003-2590-8755.ru>
ryapukhin.an@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-6935-8452>
*corresponding author

ABSTRACT

Introduction. The features of composition and structure of quartzitic sandstones of the Kursk Magnetic Anomaly affected by weathering processes, which do not meet the requirements of normative documents for obtaining crushed rock, are considered. The reserves of these rocks have not been approved as minerals and are currently stored in the form of large-tonnage dumps on the territory of the plant.

The main challenge to be solved within the framework of the work is aimed at solving the issue of expanding the raw material base of the construction industry.

Materials and methods. Efficiency evaluation of the weathered quartzite sandstone use is based on the study of indicators of physical and chemical properties. The analysis of mineral rocks was carried out using digital microscopy, the method of X-ray phase analysis. The experimental studies of the kinetics of grinding raw materials have been carried out. The activity of composite binders using weathered quartzite sandstone was studied in accordance with GOST 30744-2001.

Results. It is shown that genetic features of weathered quartzitic sandstones are caused by defective crystal structure of quartz, they are also characterised by low frost resistance and strength. The grinding efficiency of weathered quartzite sandstone is 4 times higher in comparison with untethered. It has been established that the use of these raw materials to produce composite binders makes it possible to reduce the proportion of Portland cement in the mixture by up to 50% and increase the strength of the composite binder by 20%.

Discussion and Conclusions. In consideration of current trends in the transition of the construction industry to multicomponent compositions, it is advisable to use weathered quartzite sandstone as an unconventional quartz raw material in obtaining energy-efficient building composites of a new generation.

KEYWORDS: weathered quartzite sandstone, technogenic raw materials, energy efficiency, geonics (geomimetics), resource saving, ecology.

The study was carried out within the framework of the Basic Scientific Research Plan of the Ministry of Construction of Russia and the RAASN, topic 3.1.2.6., Grant of the Russian National Research Fund No. 22-19-20115, <https://rscf.ru/project/22-19-20115/> and the Government of the Belgorod Region, Agreement No. 3 of 24.03.2022.

The article was submitted 26.07.2022; approved after reviewing 29.09.2022; accepted for publication 14.10.2022.

The authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation: Lesovik V. S., Fomina E. V., Cherepanova I. A., Ryapukhin A. N. Weathered quartite sandstones of the Kursk magnetic anomaly as a raw material for construction industry. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (5): 728-737. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-728-737>

© Lesovik V. S., Fomina E. V., Cherepanova I. A., Ryapukhin A. N., 2022



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Промышленность строительных материалов отличается от других отраслей консервативностью в использовании сырья. Уже несколько столетий основными горными породами, которые используются для производства щебня, материалов автоклавного твердения, портландцементного клинкера, керамических материалов, являются граниты, пески, известняки и глины. Применяемое в настоящее время традиционное сырье изучалось и развивалось 30–50 лет назад для производства бетонов с прочностью до 30–50 МПа, и требования к нему были соответствующие. Это привело к высокой энергоемкости производства строительных материалов и росту транспортных расходов. Кроме этого, отмечается существенное ухудшение качества минерального сырья [1, 2]. Становление строительного материаловедения, развитие горнодобывающей промышленности, а также специфика геологического строения территории Российской Федерации ориентируют на поиск новых видов сырья, которое более подготовлено геологическими и техногенными процессами для производства того или иного строительного материала. Поиск нового вида сырья является задачей мирового уровня [3, 4]. Именно этим объясняется резко возросшее количество публикаций по исследованию возможности использования в стройиндустрии природных конгломератов, породообразующими минералами которых являются термодинамически активные: опал [5], цеолиты [6], смешаннослойные образования, метаморфогенный кварц, а также сырье, представленное в основном стеклофазой [7].

По данным ЮНЕСКО в мире ежегодно извлекают из недр более 120 млрд т руд, горючих ископаемых и другого сырья. В России ежегодно образуется свыше 5 млрд т отходов, а в отвалах и хранилищах горнодобывающей отрасли страны накоплено около 60 млрд т твердых отходов [8]. Проблема отходов приобрела планетарный характер. Существенно возрастает актуальность использования техногенного сырья. Процесс комплексного использования недр в стройиндустрии затруднен, так как попутно добываемые породы и отходы промышленной переработки рудных полезных ископаемых существенно отличаются от традиционного сырья по генезису, минеральному составу, структуре и текстуре. Это объясняется тем, что экономически целесообразная глубина карьера по добыче сырья

для стройиндустрии около 100 м, а рудные месторождения разрабатываются до 500 м и более. В зону горных работ при этом попадают миллиарды тонн нетрадиционных для стройиндустрии пород, исследование и применение которых требует особых подходов и решений.

Белгородская область находится на территории Курской магнитной аномалии (КМА), где расположен Лебединский горно-обогатительный комбинат, имеющий карьер по добыче железистых кварцитов, диаметром около 5 км, глубиной более 500 м (рисунок 1).

КМА – крупнейший в мире железорудный бассейн по разведанным запасам богатых руд и железистых кварцитов, запасы которых составляют сотни миллиардов тонн.

Кафедрой строительного материаловедения БГТУ им. В.Г. Шухова под научным руководством д-ра техн. наук В. С. Лесовика был выполнен цикл работ по комплексному использованию отходов горнорудного производства. На основании этого утверждены запасы вскрышных и попутно добываемых пород железорудных месторождений КМА.

Благодаря утверждению запасов КМА стройиндустрия Белгородской области обеспечена на столетия кварцитопесчаником, щебень из которого является эффективным заполнителем бетонов (таблица 1).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При изучении образцов кварцитопесчаника применяли цифровой микроскоп Axio Scope A1.

Съемку РФА проводили на дифрактометре ДРОН-3 с использованием излучения Си-анода (Ni-фильтр для ослабления β -компоненты излучения).

Кинетику помола кварцитопесчаников изучали при помощи шаровой мельницы Retsch PM100 (420 об/мин).

Активность вяжущего изучали в соответствии с ГОСТ 30744–2001. Применяли портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н (АО «Себряковцемент»), нормальная плотность цементного теста 28%. Применяли кварцевый песок Разуменского месторождения (Белгородская область). Использовали пластифицирующую добавку – суперпластификатор СП-3 (ООО «ПК Полипласт»). Количество пластифицирующей добавки определяли экспериментальным путем при выявлении оптимального параметра 1% от массы всей смеси. В вяжущем кварцитопесчанике (невыветренный и выветренный) вводили взамен 20 и 50% портландцемента.



Рисунок 1 – Открытый способ разработки Лебединского горно-обогатительного комбината КМА
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Open method of development of the Lebedinsky mining and processing KMA plant
Source: compiled by the author.

Таблица 1

Объемы сырья стройиндустрии Белгородской области
Источник: составлено авторами.

Table 1

The volumes of raw materials of the Belgorod region construction industry
Source: compiled by the author.

Породы	Категория	Запасы по состоянию, тыс. м ³		
		Утвержденные запасы	Запасы на 01.01.97 г.	Остаток по разработанным месторождениям
Лебединское месторождение				
Метаморфические сланцы	B+C1	169072	156825	156495
Кварцитопесчаники	B+C1	196026	191110	191008
Глины и суглинки	A+B+C	16830	18345	12146
Стойленское месторождение				
Метаморфические сланцы	B+C1	241366	238839	238839
Терновское месторождение				
Глины	A+B+C1	11448	8092,1	–
Разведанные запасы				
Приоскольское месторождение				
Метаморфические горные породы	C1+C2	47842,3	–	–
Коробковское месторождение (Сретенский участок)				
Кварциты	B+C1	738582	–	–
Метаморфические сланцы	A+B+C1	2163,8	–	–
Висловское месторождение				
Бокситы	A+B+C1	1453	–	–

При проведении эксперимента производили отдельный помол компонентов в шаровой мельнице.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Кварцитопесчаники относятся к зеленосланцевой степени метаморфизма с породообразующим минералом кварца, отличающимся дефектной структурой кристаллической решетки. Доказано, что применение кварцитопесчаника для получения композиционных вяжущих позволяет существенно снизить расход портландцемента, что актуально при решении задач снижения глобальной антропогенной эмиссии парниковых газов [9, 10, 11, 12, 13, 14, 15]. Мощность зоны выветренных кварцитопесчаников составляет от 20 до 50 м. По основным физическим свойствам (плотность, морозостойкость и т. д.) эта порода не соответствует нормативным документам для получения щебня, поэтому она не внесена в сырьевую базу и ее запасы не утверждены Государственной комиссией по запасам полезных ископаемых.

Выветривание – это сложный комплекс экзогенных процессов, открытая термодинамическая система, в которой происходят механические, физические, химические и биологические процессы преобразования горных пород в условиях поверхностной части литосферы [16].

При выветривании происходит разрушение текстуры и структуры исходных горных пород за счет целого комплекса гипергенных процессов, в том числе неравномерного нагревания и охлаждения. Различные породообразующие минералы имеют неодинаковые коэффициенты теплового расширения, поэтому при изменении температуры испытывают деформации в различной степени. И в результате длительного воздействия колебаний температуры, а также других факторов (например, замораживания и оттаивания в микротрещинах воды и т. д.) кварцитопесчаники распадаются на отдельные обломки.

Визуально породы кварцитопесчаника характеризуются средне- и мелкозернистым сложением (рисунок 2).

При этом порода невыветренного кварцитопесчаника имеет серую окраску со светлыми прожилками (рисунок 2, а). Породы выветривания отличаются сахаровидным обликом с розовато-серой окраской. Также эта разновидность отличается более блеклой окраской и отсутствием специфического блеска (рисунок 2, б).

На основании микроскопического анализа кварцитопесчаник, незатронутый процессами выветривания, сложен зернами, каемки которых представлены в виде темных червеобразных микроборозд (рисунок 3, а).

Приобретение светлых оттенков породы свидетельствует о влиянии процессов выветривания [17], что наблюдается на рисунке 2, б. Выветренная порода сложена обломками зерен кварца. Это согласуется с данными из геологии [18, 19], где отмечается, что в результате процесса выветривания поверхность кварца покрывается сетью параллельных микротрещин, разбивая поверхность кристаллических частиц. На таких раздробленных поверхностях кремнезем легко подвергается растворению и переотложению в виде аморфных корочек, в результате чего зерна становятся округлыми. В условиях высоких pH в процессе диагенеза на кварцевых зернах образуются многочисленные ямки, создающие матовую поверхность зерен. Прослеживаются контуры цементации минеральных зерен в виде регенерационной каймы. По данным работы [17], на поверхности обломочных зерен кварца наблюдаются многочисленные зародышевые, иногда глобулярные образования, соединенные между собой мостиками, между этими зародышами остаются пустоты. Именно эти пустоты формируют линию, заполненную минералообразующей средой предположительно аморфной фазы. Помимо этого, в пространстве породы наблюдаются точечные включения рыжего цвета, принадлежащие соединениям гидроксида железа.

Изучение фазовой структуры кварцитопесчаника проводили с помощью РФА. В кварцитопесчаниках высокая степень кристалличности основных дифракционных пиков принадлежит кварцу (рисунок 4).

Максимальные отражения дифракционных максимумов в кварцитопесчаниках характерны для альфа-кварца $\alpha\text{-SiO}_2$. Из кристаллических фаз также присутствует небольшое количество альбита $(\text{Na,Ca})\text{Al}(\text{Si,Al})_3\text{O}_8$. Установлено в работе [18], что кремнезем в раздробленных поверхностях выветренных кварцитопесчаников легко подвергается растворению и переотложению в виде аморфных образований. Данный факт подтверждается на рентгенограмме, где отмечается снижение дифракционных отражений кварца (рисунок 4, б). Диффузные гало в выветренном кварцитопесчанике в области углов отражений $11\text{--}16^\circ 2\theta$ и $27\text{--}29^\circ 2\theta$ указывают о появлении аморфных фаз кремнезема в процессах выветривания.



Рисунок 2 – Разновидности кварцитопесчаников:
 а – незатронутый процессами выветривания; б – выветренный
 Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Varieties of quartzite sandstones:
 a – unaffected by weathering processes; b – weathered
 Source: compiled by the author.

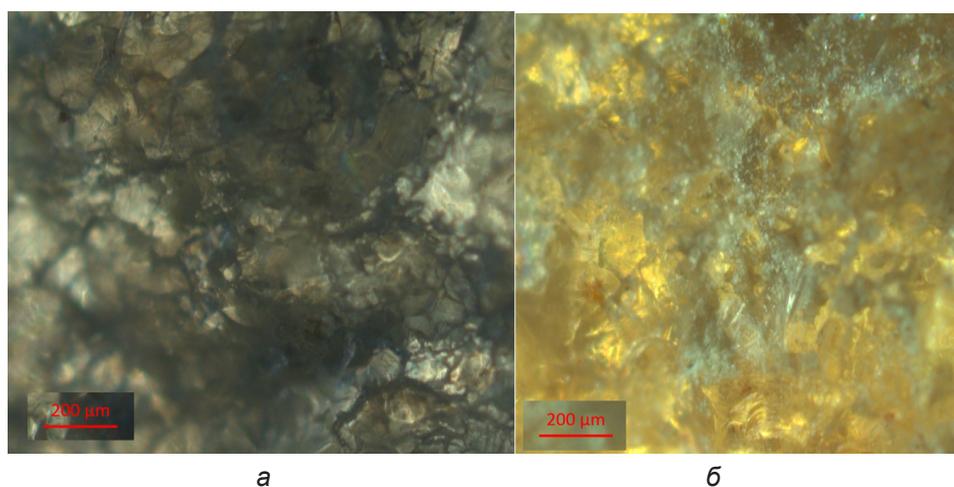


Рисунок 3 – Образцы кварцитопесчаника, изученные при помощи цифрового микроскопа:
 а – незатронутый процессами выветривания; б – выветренный
 Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Samples of quartzite sandstone studied with a digital microscope
 a – unaffected by weathering processes; b – weathered
 Source: compiled by the author.

Таким образом, данные РФА подтверждают наше предположение о том, что каемка между частицами обломочного кварца представлена цепочкой аморфных минеральных фаз. Отмечается также неустойчивость к процессам выветривания минералов полевых шпатов, интенсивность отражений которых снижается в отличие от разновидности, незатронутой процессами (см. рисунок 4, б).

Эта порода существенно отличается по свойствам от невыветренного кварцитопесча-

ника, запасы которого утверждены в качестве сырья для получения щебня (таблица 2).

Так, предел прочности при сжатии у выветренной породы уменьшается почти в два раза. Морозостойкость снижается в 12 раз, а пористость возрастает в 18 раз.

Кинетика помола кварцитопесчаников представлена на рисунке 5. Исходя из графика, динамика повышения удельной поверхности выветренного кварцитопесчаника значительно опережает размолоспособность невыветренного кварцитопесчаника.

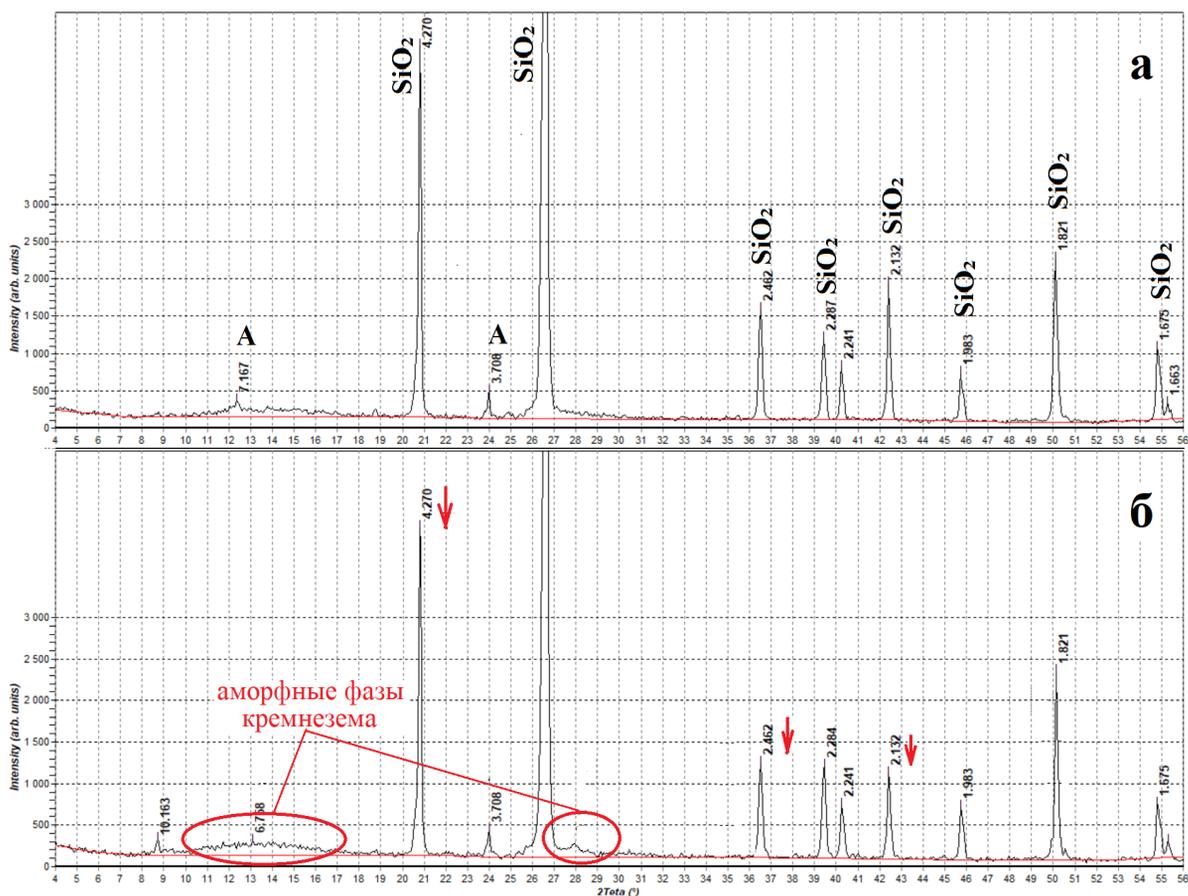


Рисунок 4 – Рентгенограмма кварцитопесчаника: а – незатронутый процессами выветривания; б – выветренный, SiO₂ – альфа-кварц α-SiO₂; А – альбит (Na,Ca)Al(Si,Al)₃O₈ Источник: составлено авторами.

Figure 4 – XRD analysis of quartzite sandstone: а – unaffected by weathering processes; б – weathered. SiO₂ – α-quartz α-SiO₂; А – albite (Na,Ca)Al(Si,Al)₃O₈ Source: compiled by the author.

Таблица 2
Сравнительные показатели кварцитопесчаников
Источник: составлено авторами.

Table 2
The comparative indicators of quartzite sandstones
Source: compiled by the author.

Показатель	Невыветренный	Выветренный
Истинная плотность ρ _{ист} , кг/м ³	2650	2600
Средняя плотность, кг/м ³	2630	2290
Пористость, %	0,91	17
Предел прочности при сжатии, МПа	1450	890
Морозостойкость, циклы	250	20

При помоле выветренного кварцитопесчаника в течение 30 мин достигается удельная поверхность 1000 м²/кг, в случае невыветренного КВП время достижения увеличивается в 4 раза.

Кинетика помола выветренного КВП отражает существенную экономическую эффективность в масштабе промышленного производства строительных материалов.

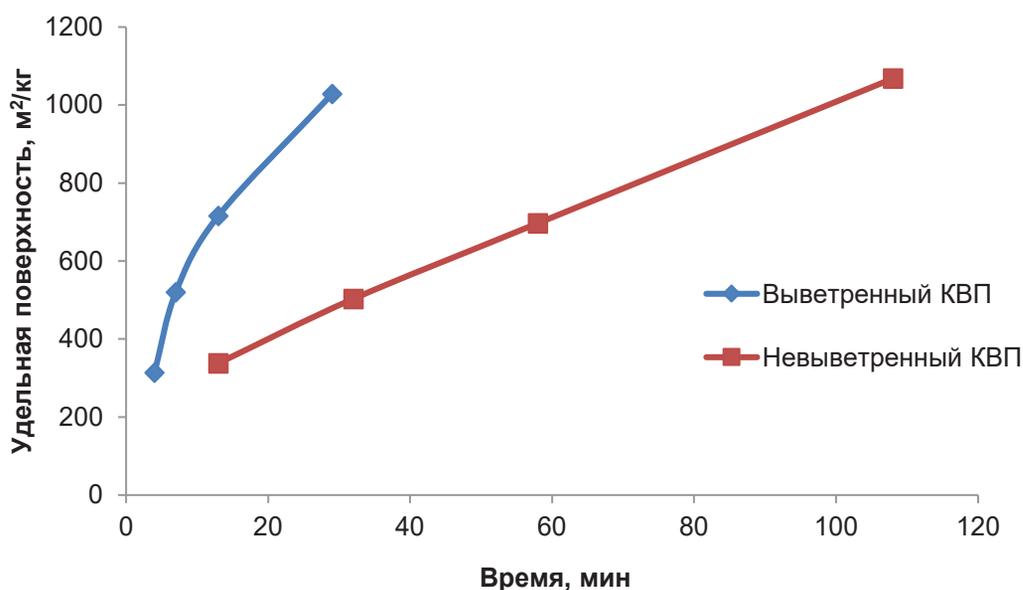


Рисунок 5 – Кинетика помола кварцитопесчаников
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Kinetics of quartzite sandstones grinding
Source: compiled by the author.

Влияние кристаллохимических особенностей выветренных кварцитопесчаников исследовали при взаимодействии с портландцементом. Для приготовления композиционных вяжущих применяли портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н (АО «Себряковцемент»), нормальная плотность цементного теста составляла 28%. Проводили домол портландцемента до удельной поверхности 500 м²/кг.

Использовали пластифицирующую добавку – суперпластификатор СП-3 (ООО «ПК Полипласт»), в количестве 1% от массы вяжущего. Кварцитопесчаник вводили взамен 20 и 50% портландцемента. Прочность при сжатии испытывали через 28 сут твердения образцов согласно ГОСТ 10180–2012. Результаты отражены в таблице 3.

Таблица 3
Влияние кварцевого сырья на прочность композиционного вяжущего
Источник: составлено авторами.

Table 3
The raw materials effect on the strength of the composite binder
Source: compiled by the author.

Состав (вяжущее)	Удельная поверхность, м²/кг		Предел прочности при сжатии, МПа	
	Портландцемент	Кварцитопесчаник	Невыветренный кварцитопесчаник	Выветренный кварцитопесчаник
ЦКВП20	500	300	52,5	55,7
		500	54,9	57,7
		700	56,1	58,8
ЦКВП50	500	300	45,0	49,9
		500	46,5	50,2
		700	48,1	55,6

*ЦКВП20 (50) – замена цемента на 20 и 50 % кварцитопесчаником.

Максимальная прочность образцов 58,8 МПа достигнута в случае применения выветренного КВП с удельной поверхностью $S_{уд.} = 700 \text{ м}^2/\text{кг}$. Экспериментально подтверждена возможность снижения доли портландцемента на 20 и 50 % соответственно при замене его на кварцитопесчаник, при возможном увеличении прочности на 20 % в сравнении с составами на невыветренном КВП.

ВЫВОДЫ

Таким образом, впервые в мировой практике доказана возможность использования кварцитопесчаников, затронутых процессами выветривания в качестве сырья для производства композиционного вяжущего. Установлено, что применение выветренного кварцитопесчаника в составе композиционных вяжущих позволяет существенно снизить долю цемента и энергоёмкость процесса помола с возможностью увеличения прочности готового композита. Полученные коллективом авторов результаты исследований позволяют геологам осуществлять поиск, разведку и утверждение запасов нового сырья для строительной индустрии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Чантурия В. А., Бочаров В. А. Современное состояние и основные направления развития технологии комплексной переработки минерального сырья цветных металлов // Цветные металлы. 2016. № 11. С. 11–18.
2. Лесовик В. С. Геоника (геомиметика). Примеры реализации в строительном материаловедении: монография. Белгород: Изд-во БГТУ. 2016. 286 с.
3. Kirthika S. K., Singh S. K., Chourasia A. Alternative fine aggregates in production of sustainable concrete – A review // Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 268. 122089.
4. Лесовик В. С., Фомина Е. В. Новая парадигма проектирования строительных композитов для защиты среды обитания человека // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. Вып. 10. С. 1241–1257.
5. Van Damme H. Concrete material science: Past, present, and future innovations // Cement and Concrete Research. 2018. Vol. 112. Pp. 5–24.
6. Gowram I., Beulah M. Use of zeolite and industrial waste materials in high strength concrete – A review // Materials Today: Proceedings. 2020. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.06.329.
7. Kozhukhova N., Zhernovskaya I., Kozhukhova M., Promakhov V. The correlation of temperature-mineral phase transformation as a controlling factor of thermal and mechanical performance of fly ash-based alkali-activated binders // Materials. 2020. Vol. 13(22). pp. 1–12.

8. Shekhovtsova J., Zhernovsky I., Kovtun M., Kozhukhova N., Zhernovskaya I., Kearsley E. Estimation of fly ash reactivity for use in alkali-activated cements-A step towards sustainable building material and waste utilization // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 178. pp. 22–33. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.12.270.

9. Лесовик В. С., Федюк Р. С., Гридчин А. М., Мурали Г. Повышение эксплуатационных характеристик защитных композитов // Строительные материалы. 2021. № 9. С. 32–40.

10. Fomina E. V., Lesovik V. S., Kozhukhova N. I., Chulenyov A. S. Role of Solutions when Metasomatic Transformations in Construction Composites // Materials Science Forum. 2020. Vol. 974. pp 168–174.

11. Lesovik V. S., Volodchenko A. A., Fisher H. B. Geonics (Geomimetics) as a Theoretical Approach for Designing and Production of Natural-Like Heat-Insulating Structurally and Composites with Acoustic Properties // Journal of Southwest Jiaotong University. 2020. Vol. 55(3).

12. Zagorodnyuk L., Sumskey D., Lesovik V., Fediuk R. Modified heat-insulating binder using jet-grinded waste of expanded perlite sand // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 260. 120440.

13. Lesovik R. V., Ageeva M. S., Matyukhina A. A., Fomina E. V. On the issue of designing structures of composite binders // Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Т. 95. pp. 246–252.

14. Lesovik V. S., Glagolev E. S., Elistratkin M. Y., Pospelova M. A., Alfimova N. I. The method of creating and measuring the printability of fine-grained concrete // Materials Science Forum. 2021. Т. 1017. pp. 71–80.

15. Ageeva M. S., Шаповалов С. М., Боцман Л. Н., Ищенко А. В. К вопросу использования промышленных отходов в производстве вяжущих веществ // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 2. С. 58–62.

16. Косолапов О. В., Душин А. В. Методический инструментальный обеспечения полноты использования невозобновимых ресурсов при экологически устойчивом недропользовании // Известия Уральского государственного горного университета. 2018. № 2 (50). С. 148–152.

17. Симанович И. М. Эпигенез и начальный метаморфизм Шокшинских кварцитопесчаников. Москва: Наука. 1966. 120 с.

18. McBride E. F. Quartz cement in sandstones: a review. Earth-Science Reviews. 1989. Vol. 26 (1–3). Pp 69–112.

19. Симанович И. М. Литогенез кварцевых песчаных пород нижнего докембрия // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический. 2013. Т. 88, № 5. С. 41–49.

REFERENCES

1. Chanturiya V. A., Bocharov V. A. *Sovremennoe sostoyaniye i osnovnyye napravleniya razvitiya tekhnologii kompleksnoy pererabotki mineral'nogo syr'ya cvetnykh metallov* [Modern state and basic ways of technology development for complex processing of non-ferrous mineral raw materials]. *Cvetnye metally*. 2016; 11: 11–18 DOI: 10.17580/tsm.2016.11.01 (In Russ.)

2. Lesovik V. S. *Geonika (geomimetika). Primery realizacii v stroitel'nom materialovedenii*. [Geonics (geomimetics). Examples of realization in construction materials science]. Belgorod: BSTU. 2016. 287 p. (In Russ.)

3. Kirthika S. K., Singh S. K., Chourasia A. Alternative fine aggregates in production of sustainable concrete – A review. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 268. 122089.

4. Lesovik V. S., Fomina E. V. *Novaya paradigma proektirovaniya stroitel'nykh kompozitov dlya zashchity sredy obitaniya cheloveka* [The new paradigm of designing construction composites to protect the human environment]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta*. 2019; 14(10): 1241-1257. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.10.1241-1257. (In Russ.)

5. Van Damme H. Concrete material science: Past, present, and future innovations. *Cement and Concrete Research*. 2018. Vol. 112. Pp. 5–24.

6. Gowram I., Beulah M. Use of zeolite and industrial waste materials in high strength concrete – A review. *Materials Today: Proceedings*. 2020. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.06.329.

7. Kozhukhova N., Zhernovskaya I., Kozhukhova M., Promakhov V. The correlation of temperature-mineral phase transformation as a controlling factor of thermal and mechanical performance of fly ash-based alkali-activated binders. *Materials*. 2020; Vol. 13(22): 1–12.

8. Shekhovtsova J., Zhernovskiy I., Kovtun M., Kozhukhova N., Zhernovskaya I., Kearsley E. Estimation of fly ash reactivity for use in alkali-activated cements—A step towards sustainable building material and waste utilization. *Journal of Cleaner Production*. 2018; 178: 22–33. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.12.270.

9. Lesovik V. S., Fediuk R. S., Gridchin A. M., Murali G. *Povyshenie ekspluatatsionnykh karakteristik zashchitnykh kompozitov* [Improving the operational characteristics of protective composites]. *Stroitel'nye Materialy*. 2021; 9: 32–40. (In Russ.)

10. Fomina E. V., Lesovik V. S., Kozhukhova N. I., Chulenyov A. S. Role of Solutions when Metasomatic Transformations in Construction Composites. *Materials Science Forum*. 2020; 974:168-174.

11. Lesovik V. S., Volodchenko A. A., Fisher H. B. Geonics (Geomimetics) as a Theoretical Approach for Designing and Production of Natural-Like Heat-Insulating Structurally and Composites with Acoustic Properties. *Journal of Southwest Jiaotong University*. 2020; 55(3).

12. Zagorodnyuk L., Sumskey D., Lesovik V., Fediuk R. Modified heat-insulating binder using jet-ground waste of expanded perlite sand. *Construction and Building Materials*. 2020; 260:120440.

13. Lesovik R. V., Ageeva M. S., Matyukhina A. A., Fomina E. V. On the issue of designing structures of composite binders. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021; 95:246–252.

14. Lesovik V. S., Glagolev E. S., Elistratkin M. Y., Pospelova M. A., Alfimova N. I. The method of creating

and measuring the printability of fine-grained concrete. *Materials Science Forum*. 2021; 1017:71–80.

15. Ageeva M. S., Shapovalov S. M., Botsman A. N., Ischenko A. V. K voprosu ispol'zovaniya promyshlennykh othodov v proizvodstve vyazhushchih veshchestv [Revising the application of industrial wastes when binders production]. *Vestnik BGTU im. V. G. Shuhova*. 2017; 2:58-62. (In Russ.)

16. Kosolapov O. V., Dushin A. V. Metodicheskiy instrumentariy obespecheniya polnoty ispol'zovaniya nevozobnovimyykh resursov pri ekologicheski ustojchivom nedropol'zovanii [Methodological tools to ensure the completeness of thenon-renewable resources use in an environmentally sustainable subsoil use]. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*. 2018; 2 (50): 148–152. (In Russ.). DOI: 10.21440/2307-2091-2018-2-148-152

17. Simanovich I. M. *Epigenez i nachal'nyj metamorfizm SHokshinskiy kvarcitopeschanikov* [Epigenesis and initial metamorphism of Shokshinsky quartzite sandstones]. Moscow: The science.1966, pp:120. (In Russ.)

18. McBride E.F. Quartz cement in sandstones: a review. *Earth-Science Reviews*. 1989; 26 (1–3): 69–112.

19. Simanovich I. M. Litogenez kvarcevykh peschanykh porod nizhnego dokembriya [Lithogenesis of early precambrian quartz sand rocks]. *Byulleten' Moskovskogo obshchestva ispytatelej prirody. Otdel geologicheskij*. 2013; 5 (88): 41–49. (In Russ.)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Каждый автор внес равную долю участия в теоретические и экспериментальные разделы статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTIONS

Each author has made equal share to theoretical and experimental sections of the article.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лесовик Валерий Станиславович – д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой строительного материаловедения, изделий и конструкций.

Фомина Екатерина Викторовна – канд. техн. наук, старший научный сотрудник.

Черепанова Ирина Александровна – аспирант.

Ряпухин Александр Николаевич – аспирант.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Valery S. Lesovik – Dr.Sci.Tech., Professor, the Head of the Construction Materials, Products and Structures Department.

Ekaterina V. Fomina – Cand. of Sci., Assistant professor.

Irina A. Cherepanova – Graduate student.

Alexander N. Ryapukhin – Graduate student.