РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ

Научная статья
УДК 574.24
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-4-361-374

CC BY 4.0

Наноструктурные изменения составляющих хризотилцементной пыли под воздействием разной величины кислотности среды и времени экспозиции

Сергей Васильевич Клюев[1, 2*], Людмила Николаевна Наумова[2], Игорь Вадимович Недосеко[3], Александр Васильевич Клюев[2], Елена Степановна Шорстова[2]

[1] Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва, Россия
[2] Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия
[3] Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: klyuyev@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье рассматривается вопрос модифицирования исходного хризотилового волокна и их пучков под действием продуктов гидратации портландцемента и различной величины кислотности обрабатываемой среды. Приведено краткое обоснование актуальности темы исследования. Отмечено, что в последние годы большой научный и практический интерес вызывают вопросы производства композиционных материалов на основе природного и техногенного сырья, являющиеся перспективным направлением современной экономики. Доступность и низкая стоимость сырья, малые энергетические, транспортные и накладные расходы, снижающие себестоимость композитов, и, вместе с тем, высокие договорные цены и спрос на внутреннем и внешнем рынках создают предпосылки для увеличения объемов их производства. Целью работы является изучение поведения исходных волокон хризотила и их агрегатов в составе цементной составляющей под воздействием разной кислотности обрабатываемой среды. **Задачи:** Электронно-микроскопическое изучение поведения составляющих хризотилцементной пыли, подвергшейся воздействию агрессивной среды. Подсчет количества числа и размерных характеристик нановолокон и частиц пыли под воздействием различного времени выдержки агрессивного фактора. Микродифракционные исследования наноструктуры исследуемых образцов после воздействия кислых сред. **Материалы и методы.** Приводятся используемые в работе материалы и их характеристики, в частности, хризотилцементная пыль, содержащая волокна товарного хризотила, кислотность среды, время выдержки, микро- и нановолокна, полученные после воздействия агрессивной среды. Образцы хризотилцементной пыли были отобраны на шиферном производстве №1 ОАО «БелАЦИ» и собраны в месте распиловки хризотилцементных изделий, прошли стадию диспергации с использованием центробежного сепаратора. В работе использована хризотилцементная пыль как обьект загрязнения окружающей среды и дальнейшего ее использования при производстве композиционных хризотилцементных изделий. **Результаты.** Представлены результаты исследований воздействия агрессивной среды на составляющие хризотилцементной пыли, их размерные характеристики и структурные наноизменения. Исследуемые пробы изучали в растровом ионно-электронном микроскопе при увеличении 200×, 500×, 5000×, 10000× и анализировали химический состав. **Обсуждение.** Приводятся результаты анализа полученных экспериментальных данных. Количественный состав волокон и агрегатов волокон в хризотилцементной пыли изменяется после ее экспозиции в кислой среде по сравнению с их количеством в исходной хризотилцементной пыли, а количество отдельных тонких волокон увеличивается, это объясняется тем, что в кислой среде происходит не только разрушение цементного камня, но и расщепление пучков волокон хризотила на микро- и нановолокна. **Выводы.** Электронно-микроскопические исследования исходных товарных волокон хризотила и их пучков в цементной пыли показали изменения их размерно-количественных характеристик, в том числе продуктов гидратации портландцемента под воздействием фактора агрессивности среды.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Товарный хризотил, хризотилцементная пыль, микро- и нановолокна, продукты гидратации, кислотность среды, количественно-размерные характеристики.

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках национального проекта «Наука и университет» по созданию новой лаборатории «Разработка, исследования и опытно-промышленная апробация наукоемких технологий и технических средств для производства полимерсодержащих композиционных смесей и изделий из техногенных органо-минеральных компонентов » (проект FZWN 2024-0002).
Работа выполнена с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:
Клюев С.В., Наумова Л.Н., Недосеко И.В., Клюев А.В., Шорстова Е.С. Наноструктурные изменения составляющих хризотилцементной пыли под воздействием разной величины кислотности среды и времени экспозиции // Нанотехнологии в строительстве. 2024. Т. 16, № 4. С. 361–374. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-4-361-374. – EDN: IXRKHR.

© Клюев С.В., Наумова Л.Н., Недосеко И.В., Клюев А.В., Шорстова Е.С., 2024

ВВЕДЕНИЕ

Хризотил, ранее известный как асбест, является одним из наиболее распространенных минералов [1–3] в группе серпентиновых силикатов [4]. Он обладает уникальными физическими [5–8] и химическими свойствами [9–11], которые делают его ценным во многих промышленных приложениях. Хризотил состоит из волокон, которые могут быть тонкими и гибкими, а также обладает высокой тенсильной прочностью [12]. Химическая формула хризотила может быть представлена как $Mg_3(Si_2O_5)(OH)4Mg_3(Si_2O_5)(OH)_4$, что указывает на его магниево-силикатный состав с гидроксильными группами [13–15]. Благодаря своей прочности, устойчивости к высоким температурам и химической инертности, хризотил нашел широкое применение в строительстве, автомобилестроении и других отраслях. В природных условиях он образует три вида структур: поперечно-волокнистые, продольно-волокнистые и спутанно-волокнистые. Обычно встречаются волокна длиной от 2 до 5 мм [16], иногда – более длинные, до 20– 30 мм [17] и крайне редко – свыше 100 мм [18].

В промышленности хризотил ценится за его выдающуюся механическую прочность [19], низкую электропроводимость [20,21], термическую устойчивость [22] и отличные адсорбционные качества [23]. Длина волокон [24] играет ключевую роль в его промышленном применении. Около 60% добываемого хризотила находит свое применение в производстве хризотилцементных изделий, которые благодаря своим уникальным свойствам широко используются в строительной индустрии и других секторах. Хризотилцементные изделия включают в себя такие материалы, как кровельные и стеновые панели, трубы [25] для водоснабжения и канализации [26], а также различные виды плит и листов [27]. Эти изделия ценятся за их прочность [28], огнестойкость и долговечность [29], что делает их популярным выбором для многих строительных проектов [30, 31].

Вершина производства хризотила [32–34] была достигнута в 1977 году, когда общий объем производства составил приблизительно 5,5 миллионов тонн, из которых более 2,5 миллионов тонн приходилось на СССР [35], а более 1,5 миллиона тонн – на Канаду [36]. С 1980-х годов, в связи с экологическими

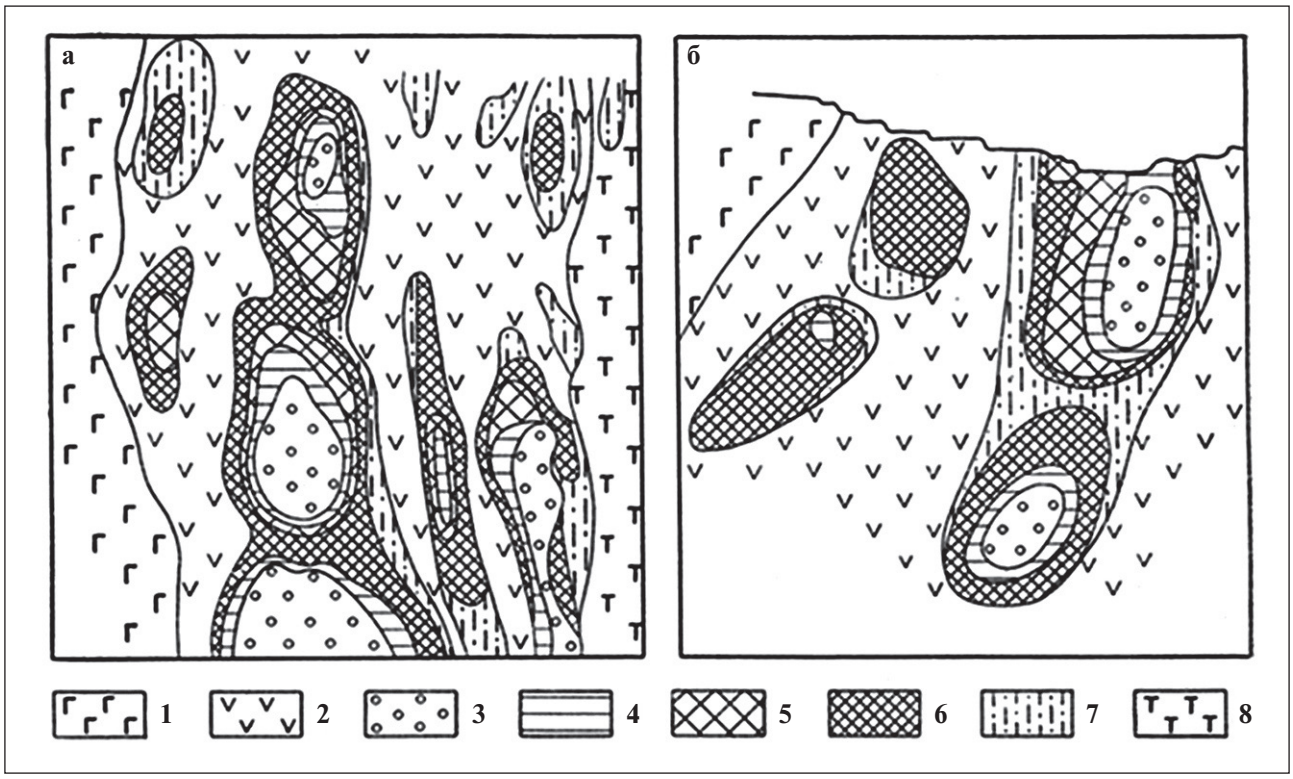

Рис. 1. **Схематическая геологическая карта (а) и поперечный разрез (б) одного из участков Баженовского месторождения хризотила. По В. Ф. Дыбкову и М. М. Трапезниковой:** 1 — габбро; 2 — серпентиниты; 3 — перидотиты; 4 — перидотиты с отороченными жилами хризотила; 5 — перидотиты и серпентиниты с асбестоносностью типа крупной сетки; 6 — серпентиниты с асбестоносностью типа мелкой сетки и «мелкопрожила»; 7 — серпентиниты с просечками хризотила; 8 — отальковaнные серпентиниты

рисками, объемы производства хризотила начали уменьшаться, упав до 2 миллионов тонн к 1998 году [37]. Сегодня основными производителями хризотила являются Россия, Канада, Китай, Бразилия, Зимбабве [38], Казахстан и Южная Африка. Общие запасы асбеста оцениваются в районе 80 миллионов тонн, с долей хризотила, превышающей 95%.

Промышленные месторождения хризотила, известного также как белый асбест, часто образуются в результате гидротермальных и метаморфических процессов [39–41], которые оказывают значительное влияние на формирование и распределение этих минералов. Гидротермальные процессы представляют собой движение горячих водных растворов через трещины и поры земной коры, что приводит к изменению химического состава окружающих пород и образованию новых минералов. В случае хризотила эти процессы могут способствовать обогащению пород магнием, что является ключевым компонентом минерала. Метаморфические процессы включают преобразование минералов под воздействием высоких температур и давления, что также характерно для зон, где встречается хризотил. Эти процессы могут привести к серпентинизации ультраосновных пород, в результате чего образуются серпентиновые минералы, в том числе хризотил. Наиболее значимые промышленные залежи относят к апоультрамафитовому типу, включающему три подтипа: баженовский, лабинский и карачаевский.

Месторождения асбеста баженовского типа относятся к особой категории, которая характеризуется определенными геологическими и минералогическими особенностями. Эти месторождения обычно связаны с баженовской свитой, которая известна своими уникальными черными сланцами, богатыми органическим веществом. Асбест баженовского типа может содержать различные формы асбестовых минералов, включая хризотил и амфиболы. Уникальность данных месторождений заключается в их концентрической зональной структуре, которая определяется широким спектром асбестовых формаций, варьирующихся от тонких слоев до одиночных и комплексных жил с обрамлением. Отличительной чертой этих залежей является их концентрическая зональность, обусловленная разнообразием асбестовых проявлений, от тонких прослоек до простых и сложных обрамленных жил. Такая структура свидетельствует о многоуровневом и сложном характере процессов, которые привели к их образованию, включая как геологические, так и гидротермальные воздействия. Это придает баженовским месторождениям особую ценность не только в контексте добычи асбеста, но и с точки зрения понимания геологической эволюции региона (рис. 2).

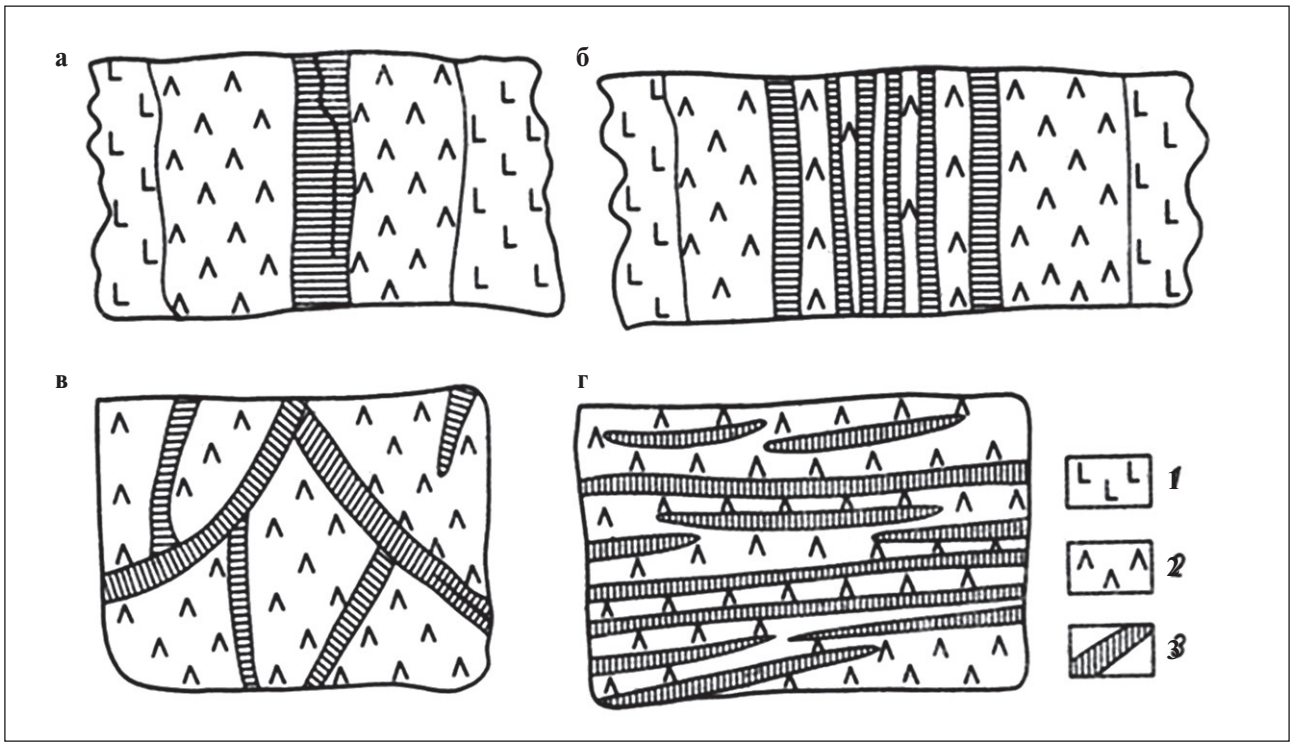

Рис. 2. **Типы жилкования хризотил-асбеста (текстуры):** а – простая отороченная жила, в центре жилы видна просечка; б – сложная отороченная жила; в – руда типа мелкой сетки; г – руда мелкопрожильная. 1 – гарцбургит, 2 – серпентинит, 3 – жилки хризотила

Основные жилы асбеста, богатые чистым хризотилом с поперечно-волокнистой структурой [42], играют ключевую роль в асбестовых месторождениях. Они встречаются в окружении массивных серпентинитов [43], за которыми следуют зоны с серпентинизированными ультрамафитами [44], прогрессирующими к слабо серпентинизированным перидотитам [45] или дунитам [46]. Эти основные жилы могут включать волокна асбеста, достигающие в длину до 60 мм, что считается значительным размером для асбестовых волокон [47].

Более сложные жилы характеризуются наличием множества параллельных асбестовых прожилков, разделенных твердым серпентинитом. Несмотря на то, что волокна в этих жилах более короткие, общий процент содержания хризотила может достигать 10%. Области, известные как «крупные сети», содержат короткие и хаотично расположенные прожилки хризотила, разделенные участками гипербазита. На окраинах месторождений находится «мелкая сеть» в полностью серпентинизированных областях основной породы [48].

Петрографические характеристики гипербазитов, включая их минералогический состав и текстуру, играют решающую роль в процессах серпентинизации. Эти процессы, протекающие в недрах Земли, приводят к преобразованию первичных магматических минералов в серпентиновые ассоциации, что существенно влияет на содержание асбеста в этих породах.

Гарцбургиты – это разновидность ультрамафитовых пород, которые часто ассоциируются с высоким содержанием асбеста. Это связано с их особым минеральным составом и условиями образования, которые способствуют формированию асбестовых минералов, таких как хризотил. В гарцбургитах, подвергшихся серпентинизации, асбестовые минералы могут образовываться в виде длинных волокон, что делает их экономически ценными.

Образование хризотил-асбеста в серпентинизированных ультрамафитах – это процесс, который привлекает внимание геологов и экологов из-за его значимости для промышленности и воздействия на окружающую среду. Хризотил-асбест, наиболее распространенный тип асбеста, образуется в результате серпентинизации, когда первичные магматические минералы, такие как оливин и пироксен, преобразуются в серпентиновые минералы под воздействием воды и давления. Эти процессы не только приводят к образованию хризотил-асбеста, но и изменяют физические и химические свойства исходной породы, делая ее менее плотной и более проницаемой.

Лабинские месторождения формируются в особых геологических условиях, характеризующихся высокой степенью серпентинизации ультрамафитов, что приводит к образованию значительных запасов хризотил-асбеста. Эти месторождения обладают разнообразным минералогическим составом, включая серпентиновые минералы, магнезит, тальк и другие ассоциированные минералы, что свидетельствует о сложных процессах их формирования. Месторождения лабинского подтипа отличаются наличием жил хризотила с поперечно-волокнистой структурой, которые могут простираться на большие расстояния [49].

Карачаевские месторождения, как и многие другие типы асбестовых месторождений, обладают рядом уникальных геологических характеристик. Одной из таких особенностей являются продольно-волокнистые жилы. Продольно-волокнистая структура жил указывает на то, что они образовались в условиях, где геологические силы действовали в определенном направлении на протяжении значительного времени. Эти жилы часто богаты асбестовыми минералами, в частности хризотилом, который является наиболее распространенным типом асбеста и широко используется в промышленности [50].

Скарновые месторождения, такие как Аспогашское в России, а также их аналоги в США и Китае, являются контактово-метасоматическими и связаны с серпентинизацией в доломитовых известняках и доломитах. Асбест скарновых месторождений отличается поперечно-волокнистой структурой и особенно низким содержанием железа, что делает его особенно ценным для электротехнической промышленности благодаря высокой чистоте и диэлектрическим свойствам материала [51].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование химического состава составляющих хризотилцементной пыли является важным аспектом для понимания их воздействия на окружающую среду и здоровье человека. Растровый ионно-электронный микроскоп Quanta 200 3D, который упомянули, действительно представляет собой мощный инструмент для таких исследований. Он позволяет не только визуализировать микрообъекты, но и анализировать их химический состав с высокой точностью благодаря энергодисперсионному анализу.

Энергодисперсионный анализ (ЭДА) или рентгеноспектральный микроанализ (РСМА) использует характеристическое рентгеновское излучение, возбуждаемое в образце под воздействием электронного пучка, для определения элементного состава. Это позволяет идентифицировать и количественно оценить присутствие различных элементов в образце.

Система ионного фокусированного пучка Magnum и микроманипулятор OmniProbe 100.7 обеспечивают возможность выделения и приго-

товления тонких фольг из конкретных участков образца, что необходимо для просвечивающей электронной микроскопии. Это позволяет получать более детальную информацию о структуре и составе материала.

Система локального нанесения вольфрама из газовой фазы «W deposition» и интегрированная система Pegasus 2000 для микроанализа с рентгеновским детектором Sapphire расширяют возможности микроскопа, позволяя проводить более сложные исследования, включая определение разориентировок зерен методом дифракции обратно-рассеянных электронов.

Две разновидности спектрометров применяются для исследования спектральных особенностей в рамках РСМА: один без использования кристалла и другой с кристаллическим анализатором. Эти устройства обеспечивают высокую точность в определении состава элементов в образцах, что критически важно для изучения характеристик пыли из хризотилцемента и оценки ее влияния.

Пыль хризотилцемента, задействованная в исследовании, была получена с производственной линии первого шиферного завода компании «БелАЦИ». Сбор пыли происходил во время процесса распиливания изделий из хризотилцемента, после чего она подвергалась диспергированию с использованием центробежного сепаратора. Для хранения образца использовалась полиэтиленовая тара с самозатягивающимся затвором.

В эксперименте для анализа влияния кислотности на структуру исходных товарных волокон хризотилцементной пыли применялись растворы с различным уровнем pH: 3, 4 и 6. Процедура включала помещение 1 грамма пыли в пробирку с последующим добавлением 20 мл раствора HCl. Растворы готовились путем разбавления 60 мл дистиллированной воды с 10 мл 0,1M HCl для достижения pH 3, 5 мл для pH 4 и 2,5 мл для pH 6. Образцы выдерживали в этих средах в течение 2 часов, суток, трех дней и недели при 30°C. После этого проводилась промывка водой и анализ образцов в растровом ионно-электронном микроскопе при увеличениях 200×, 500×, 5000× и 10000× для изучения их химического состава.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На основе полученных снимков, сделанных с помощью электронного микроскопа, осуществлялся визуальный анализ для определения количества

Таблица 1

Количественный состав исходных товарных волокон и их агрегатов в хризотилцементной пыли

№№ п.п.	Количество волокнистых частиц в асбестоцементной пыли при визуальном подсчете в электронном микроскопе, шт.								
	Агрегатов волокон					Волокон			
	Время выдержки в кислой среде	Увеличение				Увеличение			
		200ˣ	500ˣ	5000ˣ	10 000ˣ	200ˣ	500ˣ	5000ˣ	10 000ˣ
Исходная хризотилцементная пыль (дисперсный порошок)									
1	–	5	5	4	5	11	7	6	7
Исходная хризотилцементная пыль в кислой среде (PH = 3)									
1	2 часа	2	2	2	7	8	7	5	5
2	1 сутки	–	–	1	3	5	8	8	8
3	3 суток	–	2	1	–	9	13	60	80
4	1 неделя	–	1	–	2	5	15	90	100
Исходная хризотилцементная пыль в кислой среде (PH = 4)									
1	2 часа	1	2	2	1	6	19	40	180
2	1 сутки	–	1	1	–	4	16	80	150
3	3 суток	–	1	2	–	15	15	50	100
4	1 неделя	–	1	1	–	8	10	90	100
Исходная хризотилцементная пыль в кислой среде (PH = 6)									
1	2 часа	–	1	1	–	7	9	30	150
2	1 сутки	2	1	1	1	15	13	50	60
3	3 суток	1	–	–	–	12	16	50	70
4	1 неделя	–	–	–	1	9	20	150	100

* – подсчет волокон осуществляли при использовании 10 фотографий на каждый образец

отдельных волокон и их скоплений. Данные представлены в табл. 1.

Изучение данных, представленных в табл. 1, показало, что после воздействия кислотной среды количество агрегатов волокон в хризотилцементной пыли сокращается на **20–40 единиц**, в то время как число отдельных тонких волокон возрастает на **10–900 единиц**. Это изменение количества волокон и агрегатов обусловлено разрушением цементной матрицы, окружающей волокна хризотила, что приводит к дезинтеграции параллельно-волокнистых агрегатов хризотила в кислой среде.

Химический состав волокон, как исходной хризотилцементной пыли, так и образцов, подвергшихся воздействию кислоты в течение 2 часов, 1 суток, 3 суток и 1 недели при уровнях pH 3, 4 и 6 и температуре 30°C, детализирован в табл. 2.

ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование химического состава хризотилцементной пыли, подвергшейся воздействию кислоты, позволяет заключить, что происходит повышение уровня оксида кальция (CaO) на поверхности микроволокон. Это явление обусловлено адсорбцией CaO из раствора, который вымывается из гидратационных продуктов портландцемента в процессе выщелачивания.

Электронно-микроскопические снимки и микродифракционные картины волокнистой составляющей цементной пыли при различных PH среды представлены, соответственно, на рис. 3–6.

Микроволокна товарного хризотила и их пучков в хризотилцементной пыли представлены на рис. 7 и 8.

ВЫВОДЫ

Исследование химического состава нановолокон и пучков волокон хризотилцементной пыли в кислой среде представляет собой важный вклад в понимание воздействия кислотности на хризотилцементные материалы. Использование растрового ионно-электронного микроскопа Quanta 200 3D и энергодисперсионного анализа позволило точно определить изменения в количественном и химическом составе нановолокон и их пучков после выдержки в кислой среде, а также под воздействием продуктов гидратации портландцемента.

Из результатов видно, что экспозиция в кислой среде приводит к уменьшению количества агрегатов волокон и увеличению количества нановолокон. Это изменение может быть связано с разрушением цементного камня, который покрывает волокна хризотила, что приводит к распушке параллельно-волокнистых агрегатов хризотила. Химический ана-

Таблица 2

Химический состав хризотилцементной пыли и после ее экспозиции в кислой среде

№	Кислотность среды	Время экспозиции	Содержание оксидов,масс.%						
			MgO	SiO_2	SO_3	K_2O	CaO	Fe_2O_3	NiO
1	Исходная асбестоцементная пыль (порошок)		22,71	33,3	2,34	0,59	38,1	2,96	–
2	PH = 3	2 часа	19,85	33,88	1,57	0,57	41,47	2,66	–
3		1 сутки							–
4		3 суток	13,79	29,77	2,12	0,55	49,65	4,12	–
5		1 неделя	21,30	35,00	1,93	0,63	38,11	3,03	–
6	PH = 4	2 часа	22,66	34,28	1,98	0,54	38,08	2,46	–
7		1 сутки	23,27	34,75	2,24	0,53	36,12	3,1	–
8		3 суток	19,71	35,33	2,3	0,44	39,52	2,71	–
9		1 неделя	14,57	29,6	2,47	0,51	49,19	3,65	–
10	PH = 6	2 часа	20,30	31,07	2,80	0,64	41,83	3,36	–
11		1 сутки	8,96	25,35	2,54	–	55,45	7,03	0,66
12		3 суток	26,47	36,05	1,5	–	33,81	2,17	–
13		1 неделя	11,12	30,16	2,75	–	51,99	3,99	–

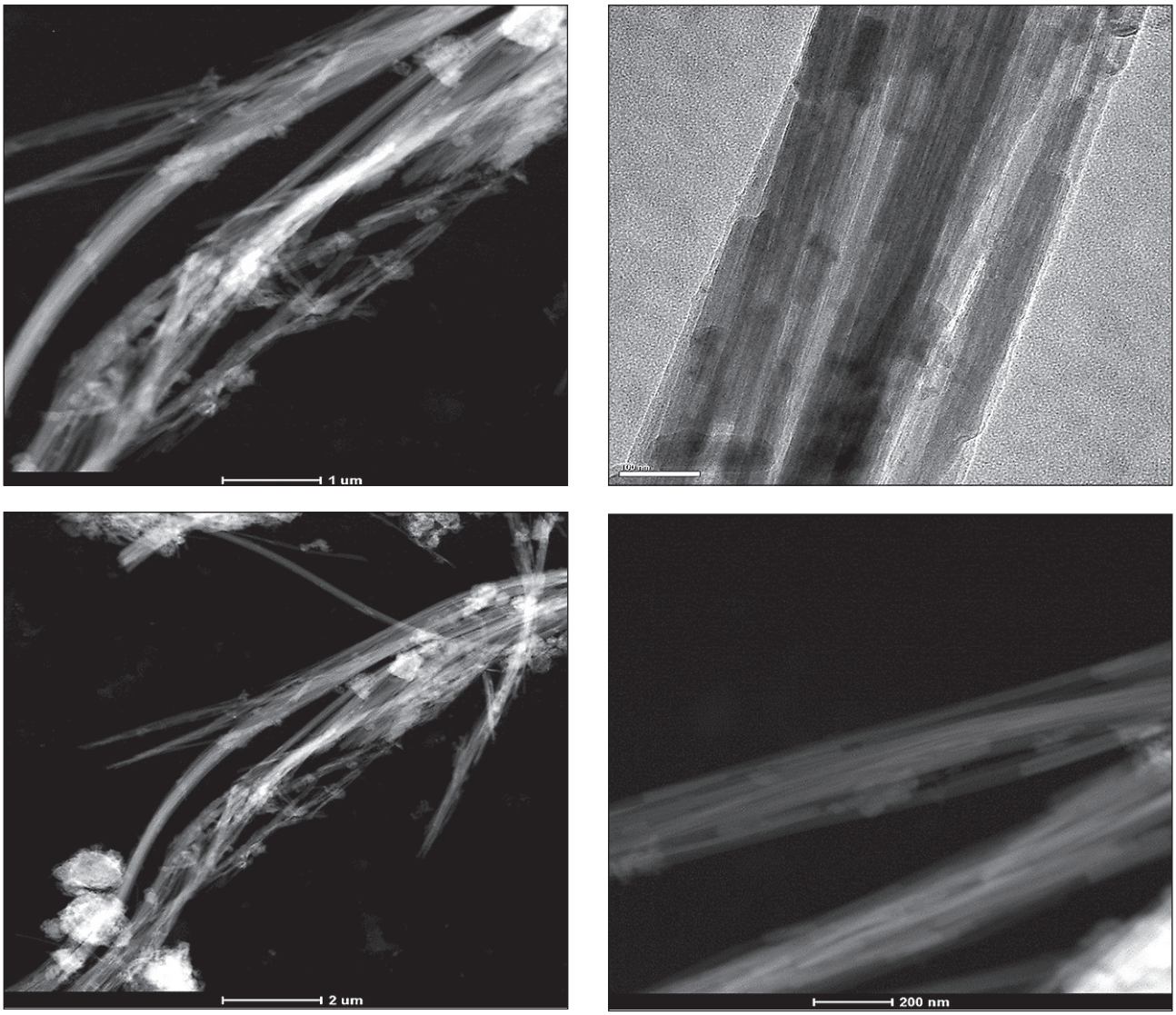

Рис. 3. **Микро- и нановолокна хризотила в образцах хризотилцементной пыли после ее выдержки в кислой среде при PH = 4 в течение 2 часов**

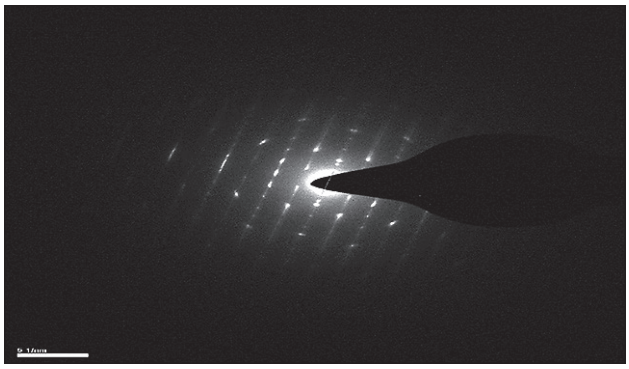

Рис. 4. **Микродифракционная картина нановолокон хризотилцементной пыли, выдержанной в кислой среде при PH = 4 в течение 2 часов**

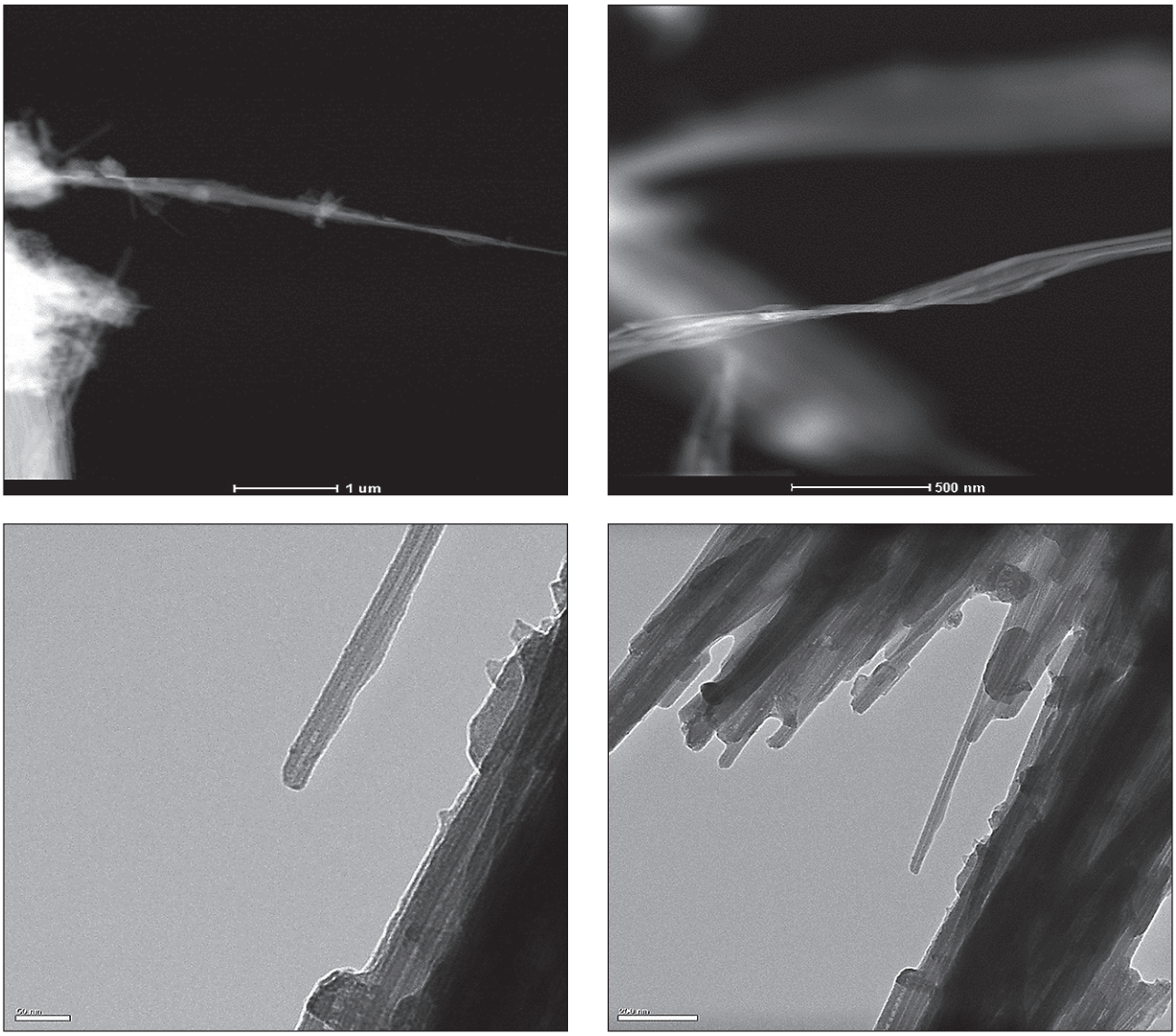

Рис. 5. **Микро- и нановолокна хризотила в образцах хризотилцементной пыли после ее выдержки в кислой среде при PH = 4 в течение 1 недели**

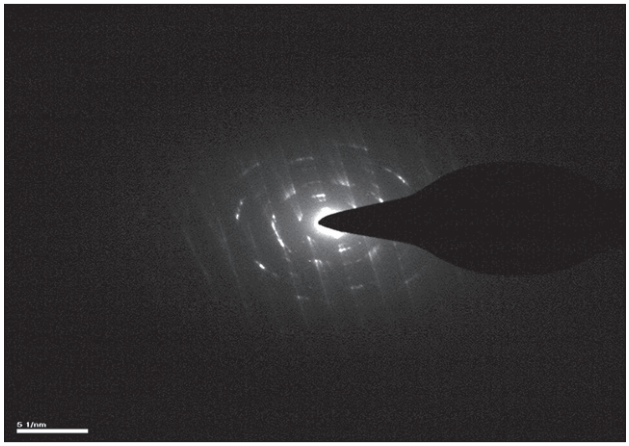

Рис. 6. **Микродифракционная картина нановолокон хризотилцементной пыли, выдержанной в кислой среде при PH = 4 в течение 1 недели**

Таблица 3

Химический состав хризотилцементной пыли после выдержки в кислой среде по данным энергодисперсионного микроанализа

№	Кислотность среды	Время экспозиции	Содержание оксидов, масс.%			
			MgO	SiO_2	CaO	Fe_2O_3
1	PH = 4	2 часа	19,82	33,75	3,18	
2		1 неделя	5,67	46,06	4,79	0,39

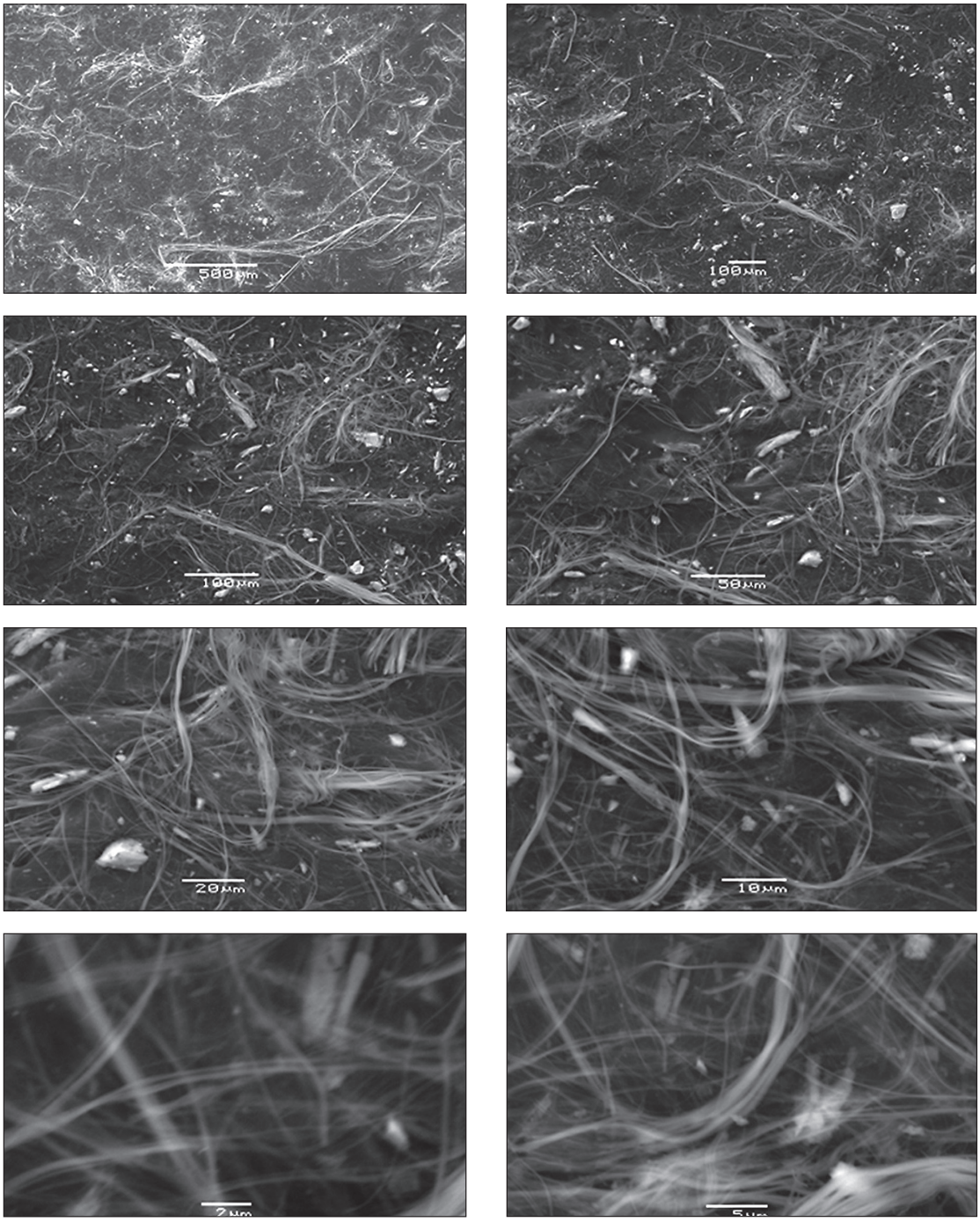

Рис. 7. **Микроволокна и пучки волокон товарного хризотила в хризотилцементной пыли**

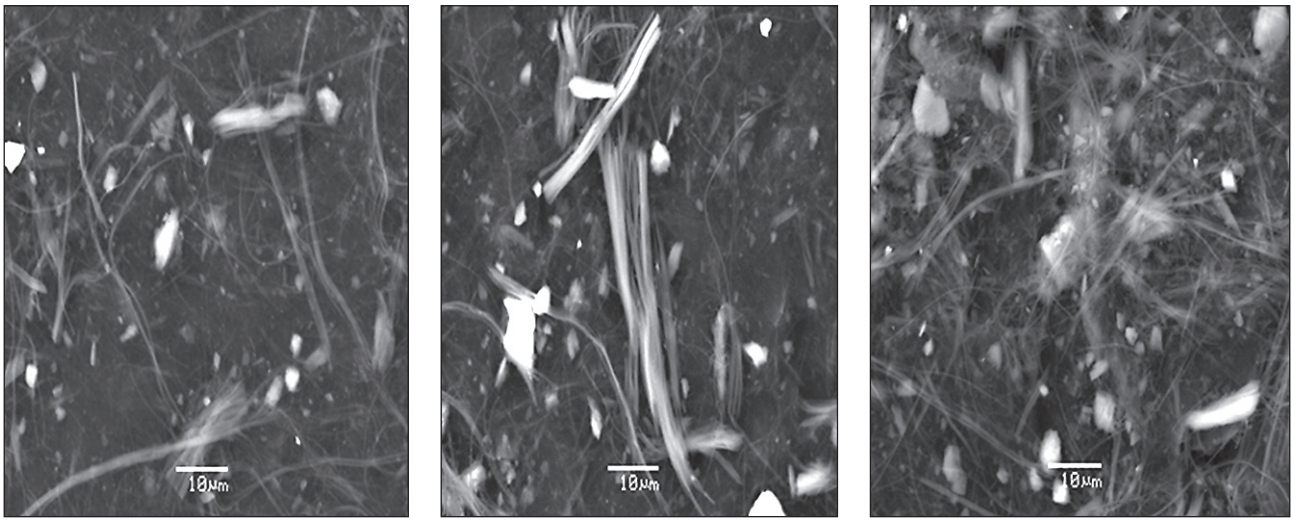

Рис. 8. **Микроволокна и пучки волокон хризотилцементной пыли**

Таблица 4

Количество различных частиц в пробах из пыли хризотилцемента и товарного хризотила по снимкам препаратов из водной суспензии

№№ п.п.	Вид и количество частиц									
	Всего	Волокнистых							Зернистых	
		Вместе волокон и пучков		Отдельно волокон		Отдельно пучков				
	шт.	шт.	% абс	шт.	% отн. от суммы всех частиц	шт.	% отн, от суммы всех частиц	% отн, от суммы волокон	шт.	% абс.
А/ц										
1	799	332	45,6	327	41,0	37	4,6	10,2	435	54,4
А тов.										
2	867	482	55,6	424	48,9	58	6,7	12,0	385	44,4

Таблица 5

Распределение по длине размеров хризотиловых волокон более 150 мкм

Единицы измерения	Количество волокон различной длины					
Мкм	До 150	150–200	200–250	250–300	300–350	350–400
А а/ц						
%, абс	95,7	0,9	2,5	0,6	0,9	-
%, сум	95,7	96,6	99,1	99,7	100,0	-
А тов						
%, абс	95,4	1,2	1,7	0,6	0,3	0,2
%, сум	95, 4	96,6	98,3	98,9	99,8	100,0

Таблица 6
Количество и размеры зернистых частиц

Единицы измерения	Количество частиц разных размеров			
мкм	от 1×1 до 2×2	от 3×3 до 6×10	от 10×18 до 15×15	от 20×30 до 100×120
А а/ц				
%, абс.	81	13	–	6
%, сум.	81	94	–	100
А тов				
%, абс	84	15	1	–
%, сум.	84	99	100	–

Таблица 7
Химический состав исходного товарного хризотила и подвергнутого воздействию затвердевшего портландцемента

№ п.п.	Содержание оксидов хризотил-асбеста, абс. %						
	MgO	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	CaO	CuO	SO_3
А а/ц							
1	39,54	0,43	43,04	1,41	15,01	–	0,57
А тов							
2	45,25	0,73	48,58	3,85	0,89	0,1	–

лиз показал увеличение содержания оксида кальция на поверхности нановолокон и их пучков, что может быть результатом его сорбции из раствора при выщелачивании из продуктов гидратации портландцемента.

Таким образом:

– показано, как ведут себя волокна исходного товарного хризотила, добываемого из дунит-гарцбургитовых пород Баженовского месторождения и используемых при производстве хризотилцементных изделий.
– проведена электронномикроскопическая оценка качества исходных товарных волокон хризотила и их пучков в цементной составляющей и после их обработки в среде с разной кислотностью.

Полученные результаты позволят использовать природное и техногенное сырье в производстве наполненных композиционных материалов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Zayed A.M., El-Khayatt A.M., Petrounias P., Shahien M.G., Mahmoud K.A., Rashad A.M., et al. From discarded waste to valuable products: Barite combination with chrysotile mine waste to produce radiation-shielding concrete. Constr Build Mater 2024;417:135334. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135334

2. Шкаредная С.А., Каскевич Т.М. Асбестосодержащие изделия и строительные материалы // Горногеологический журнал. 2005. № 2. С. 37–39.

3. Akylbekov Y., Shevko V., Karatayeva G. Thermodynamic prediction of the possibility of comprehensive processing chrysotile-asbestos waste. Case Stud Chem Environ Eng 2023;8:100488. https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100488

4. Cai N., Wang K., Li N., Huang S., Xiao Q. Novel sandwich structured chrysotile fiber separator for advanced lithium-ion batteries. Appl Clay Sci 2019;183:105327. https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.105327

5. Radvanec M., Tuček Ľ., Derco J., Čechovská K., Németh Z. Change of carcinogenic chrysotile fibers in the asbestos cement (eternit) to harmless waste by artificial carbonatization: Petrological and technological results. J Hazard Mater 2013;252–253:390–400. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.02.036

6. Gualtieri A.F., Bursi Gandolfi N., Pollastri S., Burghammer M., Tibaldi E., Belpoggi F., et al. New insights into the toxicity of mineral fibres: A combined in situ synchrotron μ-XRD and HR-TEM study of chrysotile, crocidolite, and erionite fibres found in the tissues of Sprague-Dawley rats. Toxicol Lett 2017;274:20–30. https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2017.04.004

7. Wronkiewicz S.K., Roggli V.L., Hinrichs B.H., Kendler A., Butler R.A., Christensen B.C., et al. Chrysotile fibers in tissue adjacent to laryngeal squamous cell carcinoma in cases with a history of occupational asbestos exposure. Mod Pathol 2020;33:228–34. https://doi.org/10.1038/s41379-019-0332-7

8. Lemen R.A., Wagner G.R. Asbestos. Ref. Modul. Biomed. Sci., Elsevier; 2024. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99967-0.00192-7

9. Кухта Т.Н. Повышение долговечности полимерного покрытия асбестоцементных листов при использовании гидрофобизатора // Строительные материалы. 2010. № 1. С. 58–60.

10. Tan Y., Zou Z., Qu J., Ren J., Wu C., Xu Z. Mechanochemical conversion of chrysotile asbestos tailing into struvite for full elements utilization as citric-acid soluble fertilizer. J Clean Prod 2021;283:124637. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124637

11. Федюк Р.С., Лесовик В.С., Лисейцев Ю.Л., Тимохин Р.А., Битуев А. В., Заяханов М.И. и др. Композитные вяжущие для бетонов с повышенной ударопрочностью. Инженерно- строительный журнал. 2019. 85. 28-38. https://doi.org/10.18720/MCE.85.3

12. Valouma A., Verganelaki A., Maravelaki-Kalaitzaki P., Gidarakos E. Chrysotile asbestos detoxification with a combined treatment of oxalic acid and silicates producing amorphous silica and biomaterial. J Hazard Mater 2016;305:164–70. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.11.036.

13. Klyuyev S.V., Klyuyev A.V., Sopin D.M., Netrebenko A.V., Kazlitin S.A. Heavy loaded floors based on fine-grained fiber concrete. Magazine of Civil Engineering. 2013;38(3):7–14.

14. Sambueva S.R., Batomunkueva Ts.D.D. Structural parameters of YBa2Cu3-xO6+y. Chemical Bulletin. 2024; 7 (1): 41 – 48. https://doi.org/10.58224/2619-0575-2024-7-1-41-48

15. Nel A. Carbon nanotube pathogenicity conforms to a unified theory for mesothelioma causation by elongate materials and fibers. Environ Res 2023;230:114580. https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114580

16. Gualtieri A.F., Malferrari D., Di Giuseppe D., Scognamiglio V., Sala O., Gualtieri M.L., et al. There is plenty of asbestos at the bottom. The case of magnesite raw material contaminated with asbestos fibres. Sci Total Environ 2023;898:166275. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166275

17. Peng Q., Dai Y., Liu K., Tang X., Zhou M., Zhang Y., et al. Outstanding catalytic performance of metal-free peroxymonosulfate activator: Important role of chrysotile. Sep Purif Technol 2022;287:120526. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.120526

18. Xing J., Peng Q., Zhong W., Zhang Y., Wang X., Liu K. Highly efficient activation of peroxymonosulfate by novel CuO-Chrysotile catalytic membrane for degradation of p-nitrophenol. J Water Process Eng 2023;51:103403. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103403

19. Lyakishev V.K., Perfilyev M.S. Quantum model of anharmonic vibrations of a diatomic molecule with a variable force constant and a small value of the anharmonicity coefficient. Chemical Bulletin. 2024. 7 (1). P. 22 – 31. https://doi.org/10.58224/2619-0575-2024-7-1-22-31

20. Fantone S., Tossetta G., Cianfruglia L., Frontini A., Armeni T., Procopio A.D., et al. Mechanisms of action of mineral fibres in a placental syncytiotrophoblast model: An in vitro toxicology study. Chem Biol Interact 2024;390:110895. https://doi.org/10.1016/j.cbi.2024.110895

21. Fediuk R., Smoliakov A., Stoyushko N. Increase in composite binder activity. IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., vol. 156, 2016. https://doi.org/10.1088/1757-899X/156/1/012042

22. Yoshida N., Saeki Y. Chrysotile fibers penetrate Escherichia coli cell membrane and cause cell bursting by sliding friction force on agar plates. J Biosci Bioeng 2004;97:162–8. https://doi.org/10.1016/S1389-1723(04)70186-3

23. Masoud M.A., El-Khayatt A.M., Mahmoud K.A., Rashad A.M., Shahien M.G., Bakhit B.R., et al. Valorization of hazardous chrysotile by H3BO3 incorporation to produce an innovative eco-friendly radiation shielding concrete: Implications on physico-mechanical, hydration, microstructural, and shielding properties. Cem Concr Compos 2023;141:105120. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105120

24. Bernstein D.M., Toth B., Rogers R.A., Kunzendorf P., Phillips J.I., Schaudien D. Final results from a 90-day quantitative inhalation toxicology study evaluating the dose-response and fate in the lung and pleura of chrysotile-

containing brake dust compared to TiO_2, chrysotile, crocidolite or amosite asbestos: Histopathological examinat. Toxicol Appl Pharmacol 2021;424:115598. https://doi.org/10.1016/j.taap.2021.115598

25. Chagarova O.V., Milinsky A.Yu., Kositsyna O.A. Application of thermal methods for the analysis of organic matter content in urbanozems. Chemical Bulletin. 2024. 7 (1). P. 32 – 40. https://doi.org/10.58224/2619-0575-2024-7-1-32-40

26. Abbasi M., Hosseiny B., Stewart R.A., Kalantari M., Patorniti N., Mostafa S., et al. Multi-temporal change detection of asbestos roofing: A hybrid object-based deep learning framework with post-classification structure. Remote Sens Appl Soc Environ 2024;34:101167. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101167

27. Bernasconi A., Pellegrino L., Vergani F., Campanale F., Marian N.M., Galimberti L., et al. Recycling detoxified cement asbestos slates in the production of ceramic sanitary wares. Ceram Int 2023;49:1836–45. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.09.147

28. Saba M., Torres Gil L.K., Chanchí Golondrino G.E. Physicochemical analysis of primers and liquid membranes as asbestos' encapsulant. Constr Build Mater 2023;409:133972. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133972

29. Ranaivomanana H., Leklou N. Investigation of microstructural and mechanical properties of partially hydrated Asbestos-Free fiber cement waste (AFFC) based concretes: Experimental study and predictive modeling. Constr Build Mater 2021;277:121943. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121943

30. Punenkov S.E. Composites materials based on natural chrysotile fibers. Chemical Bulletin. 2024. 7 (1). P. 4 – 21. https://doi.org/10.58224/2619-0575-2024-7-1-4-21

31. Klyuyev S.V., Kashapov N.F., Radaykin O.V., Sabitov L.S., Klyuyev A.V., Shchekina N.A. Reliability coefficient for fibreconcrete material. Construction Materials and Products 2022;5:51–58. https://doi.org/10.34031/2618-7183-2022-5-2-51-58

32. Boffetta P., Righi L., Ciocan C., Pelucchi C., La Vecchia C., Romano C., et al. Validation of the diagnosis of mesothelioma and BAP1 protein expression in a cohort of asbestos textile workers from Northern Italy. Ann Oncol 2018;29:484–9. https://doi.org/10.1093/annonc/mdx762

33. Sabat M., Fares N., Mitri G., Kfoury A. Determination of asbestos cement rooftop surface composition using regression analysis and hyper-spectral reflectance data in the visible and near-infrared ranges. J Hazard Mater 2024;469:134006. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.134006

34. Klyuyev S.V., Guryanov Yu.V. External reinforcing of fiber concrete constructions by carbon fiber tapes. Magazine of Civil Engineering. 2013; 36(1):21–26.

35. Feletto E., Schonfeld S.J., Kovalevskiy E.V., Bukhtiyarov I.V., Kashanskiy S.V., Moissonnier M., et al. A comparison of parallel dust and fibre measurements of airborne chrysotile asbestos in a large mine and processing factories in the Russian Federation. Int J Hyg Environ Health 2017;220:857–68. https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2017.04.001

36. Bridle J., Hoskins J. Canadian hypocrisy regarding chrysotile. Lancet 2011;377:720. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(11)60271-7

37. Пуненков С.Е., Козлов Ю.С. Хризотил-асбест и ресурсосбережение в хризотил-асбестовой отрасли // Горный журнал Казахстана. 2022. № 1. С. 5–10.

38. Chaumba J.B., Mamuse A. Petrographic and mineral chemistry investigation of the high-grade chrysotile asbestos-bearing Zvishavane Ultramafic Complex, south central Zimbabwe. Geochemistry 2023;83:125950. https://doi.org/10.1016/j.chemer.2023.125950

39. Biondi J.C. Neoproterozoic Cana Brava chrysotile deposit (Goiás, Brazil): Geology and geochemistry of chrysotile vein formation. Lithos 2014;184–187:132–54. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.10.017

40. Kuznetsov D.V., Klyuev S.V., Ryazanov A.N., Sinitsin D.A., Pudovkin A.N., Kobeleva E.V., Nedoseko I.V. Dry mixes on gypsum and mixed bases in the construction of low-rise residential buildings using 3D printing technology. Construction Materials and Products. 2023. 6 (6). 5. https://doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-6-5

41. Klyuev A.V., Kashapov N.F., Klyuev S.V., Lesovik R.V., Ageeva M.S., Fomina E.V. Development of alkali-activated binders based on technogenic fibrous materials. Construction Materials and Products. 2023; 6 (1): 60–73. https://doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-1-60-73

42. Klyuev A.V., Kashapov N.F., Klyuev S.V., Zolotareva S.V., Shchekina N.A., Shorstova E.S., Lesovik R.V., Ayubov N.A. Experimental studies of the processes of structure formation of composite mixtures with technogenic mechanoactivated silica component. Construction Materials and Products. 2023; 6 (2):5 – 18. https://doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-2-5-18

43. Hodel F., Macouin M., Triantafyllou A., Carlut J., Berger J., Rousse S., et al. Unusual massive magnetite veins and highly altered Cr-spinels as relics of a Cl-rich acidic hydrothermal event in Neoproterozoic serpentinites (Bou Azzer ophiolite, Anti-Atlas, Morocco). Precambrian Res 2017;300:151–67. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.08.005

44. Наумова Л.Н. Влияние кислой среды на свойства хризотил-цементной пыли // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2011. № 2. С. 24–27.

45. Portella Y de M., Conceição R.V., Siqueira T.A., Gomes L.B., Iglesias R.S. Experimental evidence of pressure effects on spinel dissolution and peridotite serpentinization kinetics under shallow hydrothermal conditions. Geosci Front 2024;15:101763. https://doi.org/10.1016/j.gsf.2023.101763

46. Wang L., Xiong Q., Zheng J-P., Dai H-K., Tian L-R., Zhou X. Multistage and diverse melt-mantle interaction in dunite-harzburgite channel systems beneath oceanic slow-ultraslow spreading centers: Evidence from the Xigaze ophiolite (Tibet). Lithos 2024;468–469:107501. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2024.107501

47. Capitani G., Dalpiaz M., Vergani F., Campanale F., Conconi R., Odorizzi S. Recycling thermally deactivated asbestos cement in mortar: A possible route towards a rapid conclusion of the "asbestos problem." J Environ Manage 2024;355:120507. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120507

48. Fitzgerald S.M. Resolving asbestos and ultrafine particulate definitions with carcinogenicity. Lung Cancer 2024:107478. https://doi.org/10.1016/j.lungcan.2024.107478

49. Jefferson I.F., Evstatiev D., Karastanev D., Mavlyanova N.G., Smalley I.J. Engineering geology of loess and loess-like deposits: a commentary on the Russian literature. Eng Geol 2003;68:333–51. https://doi.org/10.1016/S0013-7952(02)00236-3

50. Okrostsvaridze A., Chung S-L., Lin Y-C., Skhirtladze I. Geology and zircon U-Pb geochronology of the Mtkvari pyroclastic flow and evaluation of destructive processes affecting Vardzia rock-cut city, Georgia. Quat Int 2020;540:137–45. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2019.03.026

51. Liu W., Wan B. Carbon flux from hydrothermal skarn ore deposits and its potential impact to the environment. Gondwana Res 2024;126:343–54. https://doi.org/10.1016/j.gr.2023.09.017

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Клюев Сергей Васильевич – доктор технических наук, профессор, Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия, klyuyev@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-1995-6139

Наумова Людмила Николаевна – кандидат технических наук, доцент Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия, naymova_ln@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-4822-3767

Недосеко Игорь Вадимович – доктор технических наук, профессор, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия, nedoseko1964@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6360-6112

Клюев Александр Васильевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая механика и сопротивление материалов», Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия, megastaryj@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-0845-8414

Шорстова Елена Степановна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая механика и сопротивление материалов», Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия, kuzik_alena@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-4031-0989

ВКЛАД АВТОРОВ

Авторы внесли равный вклад в эту статью.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 08.07.2024; одобрена после рецензирования 09.08.2024; принята к публикации 14.08.2024.