

Интернет-журнал «Отходы и ресурсы» <https://resources.today>  
Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling

2024, Том 11, № 1 / 2024, Vol. 11, Iss. 1 <https://resources.today/issue-1-2024.html>

URL статьи: <https://resources.today/PDF/14NZOR124.pdf>

DOI: 10.15862/14NZOR124 (<https://doi.org/10.15862/14NZOR124>)

1.6.21. Геоэкология (геолого-минералогические науки)

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Тимошик, О. А. Получение диоксида кремния из отходов абразивных материалов / О. А. Тимошик, Е. А. Щелокова, А. Г. Касиков // Отходы и ресурсы. — 2024. — Т. 11. — № 1. — URL: <https://resources.today/PDF/14NZOR124.pdf> DOI: 10.15862/14NZOR124

**For citation:**

Timoshchik O.A., Shchelokova E.A., Kasikov A.G. Obtaining of silicon dioxide from abrasive wastes. *Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling*. 2024; 11(1): 14NZOR124. Available at: <https://resources.today/PDF/14NZOR124.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: 10.15862/14NZOR124

Авторы благодарят Рычкова А.В. за предоставление образцов отходов абразивных материалов

УДК 546.284

**Тимошик Ольга Александровна**

ФГБУН ФИЦ «Кольский научный центр Российской академии наук», Апатиты, Россия  
Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья имени И.В. Тананаева  
Инженер-исследователь  
E-mail: o.timoshchik@ksc.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7890-8308>

РИНЦ: [https://www.elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=1084867](https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=1084867)

**Щелокова Елена Анатольевна**

ФГБУН ФИЦ «Кольский научный центр Российской академии наук», Апатиты, Россия  
Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья имени И.В. Тананаева  
Старший научный сотрудник  
Кандидат технических наук  
E-mail: e.shchelokova@ksc.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3374-6856>

РИНЦ: [https://www.elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=597799](https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=597799)

**Касиков Александр Георгиевич**

ФГБУН ФИЦ «Кольский научный центр Российской академии наук», Апатиты, Россия  
Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья имени И.В. Тананаева  
Ведущий научный сотрудник  
Кандидат химических наук, доцент  
E-mail: a.kasikov@ksc.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7694-0910>

РИНЦ: [https://www.elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=159023](https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=159023)

## Получение диоксида кремния из отходов абразивных материалов

**Аннотация.** При производстве абразивных материалов из металлургических шлаков образуются мелкодисперсные отходы размером менее 40 мкм, в составе которых содержатся ценные компоненты. В отличие от шлаков данные отходы не нужно измельчать для их переработки, что значительно упрощает процесс. Однако без выделения диоксида кремния нецелесообразно проводить переработку отходов. Авторами работы рассмотрена возможность получения диоксида кремния из отходов абразивных материалов г. Реж, г. Орск и г. Кыштым,

содержащих до 20,7 % кремния, до 31,7 % железа и до 0,7 % суммы никеля и меди. При серноокислотной переработке отходов получен раствор, содержащий сульфаты магния и железа (II), а также кремнекислоту. Установлено, что при переработке орских отходов степень извлечения компонентов значительно ниже в сравнении с режскими и кыштымскими 24,5, 67,8 и 59,3, соответственно. Полученный раствор используется для получения порошков диоксида кремния путем его дегидратации. Высушенная смесь подвергается водной отмывке от сульфатов металлов. В результате получены образцы с высокой удельной поверхностью в диапазоне 387,6–841,5 м<sup>2</sup>/г. Средний размер пор 2,3–3 нм, что позволяет отнести данные кремнеземы к мезопористым. Содержание SiO<sub>2</sub> в образцах достигает до 98 %. Образцы диоксида кремния из абразивных материалов были сравнены с полученным из металлургического шлака комбината «Печенганикель» и имеют схожие параметры. Полученные нерастворимые остатки выщелачивания содержат в себе концентрат цветных металлов и по данным рентгенограммы состоят из сульфата кальция, поэтому после выделения цветных металлов он может быть использован в строительной индустрии.

**Ключевые слова:** техногенные отходы; абразивные материалы; шлак; Урал; гидрометаллургия; выщелачивание; диоксид кремния

### Введение

Диоксид кремния находит широкое применение в различных областях. Его можно использовать в качестве сорбента, катализатора, в пищевой, косметической и фармакологической промышленности, а также добавки в строительные смеси [1–8]. Преимущества диоксида кремния заключаются в том, что он не токсичен, не содержит примеси, а при получении можно варьировать его свойства [8; 9]. Однако большая часть кремнезема ввозится в Россию из-за рубежа. Поэтому крайне важно производить диоксид кремния на территории страны в больших масштабах.

По данным Федеральной таможенной службы Российской Федерации на 2020 г средняя стоимость экспорта диоксида кремния составляет 1,31 \$ за 1 кг. Цена экспорта значительно варьируется по странам мира, поскольку большое влияние на разницу в ценах оказывает спецификация поставок и их объем. По данным сайта [businessanalytiq.com](https://businessanalytiq.com)<sup>1</sup> на октябрь 2023 г. стоимость диоксида кремния составляет 0,44–0,93 \$ за 1 кг в зависимости от стран мира. По данным [indexbox.io](https://www.indexbox.io)<sup>2</sup> стоимость диоксида кремния за тонну в 2023 г. достигла 4 581 \$ за тонну в Великобритании и увеличивается в среднем на 2,1 % в месяц.

Известно несколько способов получения диоксида кремния. Так, например, его получают путем осаждения из растворов, содержащих силикаты щелочных металлов, минеральными кислотами или карбонизацией путем пропускания через раствор CO<sub>2</sub>, при переработке отходов производств<sup>3</sup>, из кремнефильных растений<sup>4</sup>, гидролизом галогеновых и кремнийорганических соединений или пиролиза тетраэтоксисилана [8; 10–16]. Сообщается

<sup>1</sup> <https://businessanalytiq.com/procurementanalytics/index/silicon-dioxide-price-index/>.

<sup>2</sup> <https://www.indexbox.io/blog/silicon-dioxide-price-per-ton-may-2022/>.

<sup>3</sup> Патент № 2765952 Российская Федерация, МПК C01B 33/12 (2006.01). Способ получения аморфного диоксида кремния из отходов переработки кремнефтористоводородной кислоты и производства фторида алюминия: № 2021113558: заявл. 13.05.2021: опубл. 7.02.2022 / Пягай И.Н., Шайдулина А.А., Артюшевский Д.И.; заявитель Санкт-Петербургский горный университет. — 9 с.: ил. — Текст: непосредственный.

<sup>4</sup> Патент № 2394764 Российская Федерация, МПК C01B 33/12 (2006.01), B82B 1/00 (2006.01). Способ получения диоксида кремния: № 2009114380: заявл. 15.04.2010: опубл. 20.07.2010 / Земнухова Л.А., Федорищева Г.А.; заявитель Институт химии ДВО РАН. — 8 с.: ил. — Текст: непосредственный.

также о получении высокочистого кремнезема из осадков сточных вод [17]. Однако для некоторых способов требуются большие затраты энергии, реагентов и средств, а использование фторидных соединений нежелательно, поскольку они являются агрессивными. Наиболее предпочтительным способом являются гидрометаллургические способы, которые проще в исполнении и малозатратны.

Переработка техногенных отходов, содержащих диоксид кремния, предпочтительна как с экологической, так и с экономической точек зрения. Кроме того, переработка отходов без выделения диоксида кремния не является целесообразной.

Одним из высокремнистых продуктов, которые могут содержать более 40 %  $\text{SiO}_2$ , являются отходы производства абразивных материалов из металлургических шлаков. Абразивные материалы образуются в результате переработки металлургического шлака. Получение абразивных материалов из металлургических шлаков обусловлено тем, что в европейских странах запрещено использовать абразивные материалы, которые содержат более 1 % свободного кремния [18]. Наиболее известными абразивами являются купершлак и никельшлак, причем никельшлак имеет более высокую твердость. К преимуществам купершлака относят то, что он не наносит вред ни людям, ни окружающей среде, а также соотношение цена:качество. Его рекуперация достигает пяти раз, однако это приводит к снижению размера частиц и увеличению примесей, что сказывается на процессе чистки.

Выбор данных отходов обусловлен тем, что шлаки необходимо измельчать, в то время как отходы абразивных материалов состоят из мелкой фракции менее 40 мкм, потому их переработка не требует операции измельчения и, соответственно, трат на электроэнергию, которые достигают значений от 4 до 8 кВт·ч/т для измельчения шлака.

Отходы, полученные при производстве абразивных материалов, складываются или используются для засыпки других материалов. Как и другие металлургические отходы, абразивные материалы могут быть переработаны с помощью серной<sup>5</sup> или соляной кислот<sup>6</sup> [19; 20]. Но сернокислотный метод имеет ряд преимуществ относительно серноокислотного. Поэтому в работе была поставлена следующая цель: проведение вскрытия отходов абразивных материалов сернокислотным способом с получением образцов диоксида кремния и изучение их физико-химических параметров.

### Материалы и методы исследования

Исходными материалами являются отходы абразивных материалов производств г. Реж (Свердловская обл.), г. Кыштым (Челябинская обл.) и г. Орск (Оренбургская обл.). Абразивные материалы получают следующим способом. Шлак (влажность  $\geq 10$  %) попадает в приемный бункер, который оснащен колосниковой решеткой для предотвращения попадания крупных вкраплений, затем по транспортной ленте попадает в сушильную установку, которая не допускает пересушки. Высушенный материал подается в систему воздушных классификаторов с группой циклонов для выделения мелкодисперсных фракций. Материал крупностью 630 мкм поступает в грохот линейно-кругового движения для отсева конечных продуктов по необходимому фракционному составу абразивного порошка. В результате можно получить

<sup>5</sup> Патент № 2765974 Российская Федерация, МПК С22В 7/04 (2006.01), С22В 3/08 (2006.01), С01В 33/12 (2006.01). Способ переработки металлургического шлака: № 2021119888: заявл. 06.07.2021: опубл. 07.02.2022 / Касиков А.Г., Щелокова Е.А., Тимошик О.А., Будникова Н.Н.; заявитель ИХТРЭМС КНЦ РАН. — 10 с. — Текст: непосредственный.

<sup>6</sup> Патент № 2568796 Российская Федерация, МПК С22В 7/04 (2006.01), С22В 3/10 (2006.01), С22В 15/00 (2006.01). Способ вскрытия шлака: № 201422654: заявл. 03.06.2014: опубл. 20.11.2015 / Касиков А.Г., Майорова Е.А.; заявитель ИХТРЭМС КНЦ РАН. — 8 с. — Текст: непосредственный.

4 класса итогового продукта.<sup>7</sup> На различных этапах обработки шлака мелкие частицы материала остаются в тех или иных узлах цепи и являются отходами абразивных материалов. В работе [20] описан еще один способ получения абразивных материалов из металлургического шлака. В данном способе шлак высушивают и отправляют на грохочение, надрешетный продукт измельчается в специальной роторной дробилке, а затем снова возвращается на грохот. Пылевую фракцию улавливает циклон.

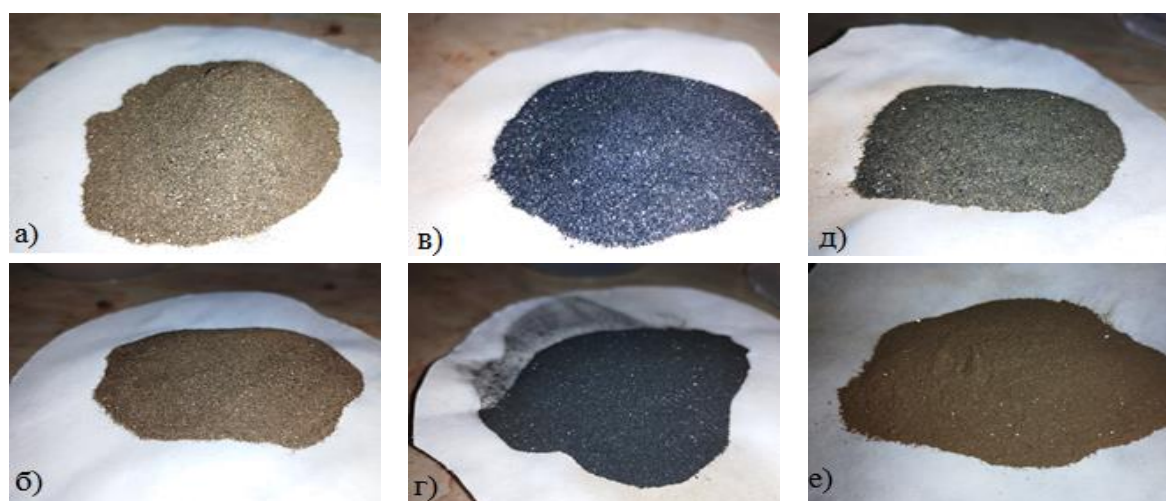
Полученные абразивные материалы применяют в машиностроительной, вагоноремонтной, авиаремонтной, судоремонтной, лакокрасочной и других областях промышленности для очистки различных поверхностей. Составы отходов абразивных материалов, полученных в результате их производства, представлены в таблице 1, внешний вид представлен на рисунке 1. В работах [21; 22] были рассмотрены шлаки Карабашского медеплавильного завода, находящегося в Кыштымском районе, а также Ржевского никелевого завода.

**Таблица 1**

**Составы исходных отходов абразивных материалов**

Отходы абразивных материалов		Fe, %	Si, %	Cu, %	Ni, %	Al, %	Ca, %	Mg, %
Реж	Циклон	15,2	16,3	0,015	0,57	4,34	9,82	3,78
	Газоочистка	13,6	17,4	0,01	0,49	4,55	10,9	3,96
Кыштым	Пыль классификатора	31,2	14,9	0,35	0,023	3,05	5,42	0,89
	Сушильный барабан	31,7	14,9	0,43	0,027	3,3	4,85	0,87
Орск	Пыль классификатора	16,1	20,7	0,01	0,48	3,06	8,38	5,45
	Сушильный барабан	16,2	19,4	0,012	0,28	2,93	9,62	5,87

*Составлено авторами*



**Рисунок 1.** Внешний вид образцов отходов абразивных материалов: а — Реж Газоочистка; б — Реж Циклон; в — Кыштым Пыль классификатора; г — Кыштым Сушильный барабан; д — Орск Пыль классификатора; е — Орск Сушильный барабан (фото авторов)

Из таблицы видно, что отходы различаются по содержанию цветных металлов и железа.

По данные рентгенофазового показывает, что все отходы представлены рентгеноаморфными фазами и практически не отличаются друг от друга. Рентгенофазовый анализ осуществляли с использованием дифрактометра XRD 6000 (Shimadzu, Япония) с источником излучения Cu<sub>Kα</sub>.

<sup>7</sup> Патент № 2627413 Российская Федерация, МПК С09К 3/14 (2006.01), С09Г 1/02 (2006.01), В24Д 3/00 (2006.01). Абразивный порошок для обработки поверхностей и его применение: № 2016130926: заявл. 27.07.2016: опубл. 08.08.2017 / Бишко П.Б., Бишко С.П., Фукс А.В.; заявитель Бишко С.П. — 9 с.: ил. — Текст: непосредственный.

Термогравиметрический анализ исходных образцов проводили на приборе NETZCH STA 409 PC/PG (Германия) в интервале температур от 20 до 1 000°C в атмосфере аргона в платиновых тиглях при скорости нагревания 10°/мин. Исследования образцов методом ИК-Фурье спектроскопии проводили на спектрофотометре Nicolet 6700 FT-IP (США) в диапазоне волновых чисел от 400 до 4 000 см<sup>-1</sup>.

С целью получения порошков диоксида кремния переработку исходного сырья проводили по ранее изученному способу вскрытия металлургического шлака, описанному в [19; 20]. Навеску загружали в серную кислоту при соотношении твердого компонента к кислоте (Т:Ж) 1:9. Вскрытие проводилось при комнатной температуре и при перемешивании в течение часа. Пульпу фильтровали на воронке Бюхнера и колбе Бунзена с помощью вакуумного насоса.

Содержание элементов в растворах и осадках определяли атомно-абсорбционным (Квант-2, Россия) и атомно-эмиссионным (ICPS-9000, Shimadzu, Япония) методами. О дисперсности продуктов судили по результатам измерения свободной удельной поверхности  $S_{уд}$  методом низкотемпературной термической десорбции азота БЭТ на лабораторном измерителе удельной поверхности и пористости «FlowSorb II 2300». Измерение pH растворов проводилось с помощью pH-метра МИ-150 с электродом и термодатчиком.

### Результаты исследования и их обсуждение

Для извлечения кремнезёмов в раствор серной кислоты с концентрацией 7 % добавляли отходы абразивного материала в соотношении Т:Ж = 1:9. При выщелачивании большая часть железа и кремния переходит в раствор, а большая часть цветных металлов остается в нерастворимом остатке (табл. 2). Основу остатка составляет сульфат кальция, что было подтверждено РФА (рис. 2).

Таблица 2

#### Состав и извлечение компонентов в раствор

Отходы абразивных материалов		Fe		Si		Cu		Ni	
		г/л	%	г/л	%	г/л	%	г/л	%
Реж	Циклон	8,8	53,7	11,5	65,8	0,0025	15,5	0,13	21,2
	Газоочистка	9,6	62,8	13,3	67,8	0,0012	10,7	0,13	23,6
Кыштым	Пыль классификатора	20,9	59,6	8,7	52,0	0,001	0,25	0,0055	21,3
	Сушильный барабан	20,8	61,6	9,4	59,3	0,001	0,22	0,0092	32,0
Орск	Пыль классификатора	6,5	38,3	5,7	24,5	0,001	9,5	0,051	17,3
	Сушильный барабан	8,0	39,6	6,8	26,2	0,0015	10,0	0,11	18,3

Составлено авторами

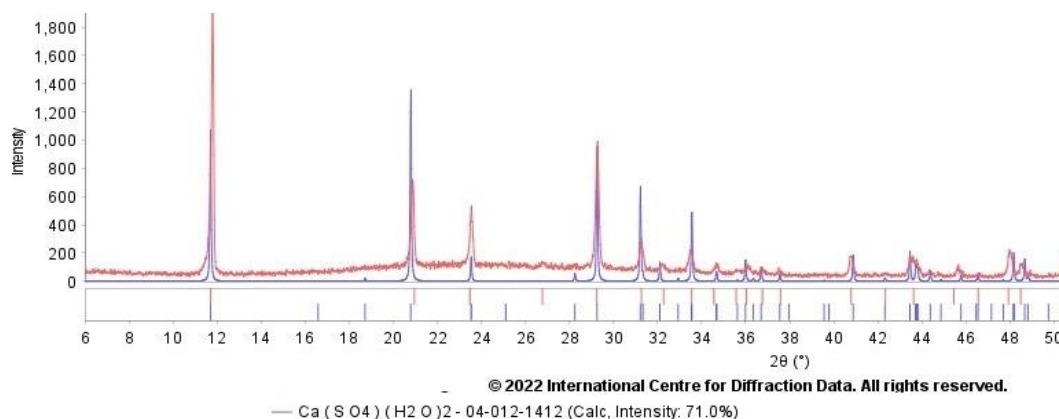


Рисунок 2. Рентгенограмма остатка выщелачивания отходов абразивных материалов (Реж) (составлено авторами)

Таблица 3

**Составы остатков выщелачивания отходов абразивных материалов**

Отходы абразивных материалов		Сокращение остатка	Fe	SiO <sub>2</sub>	Mg	Ca	Cu	Ni	Co
Реж	Циклон	1,7	10,7	18,52	2,03	14,6	0,018	0,72	0,02
	Газоочистка	1,7	6,35	15,34	1,22	14,9	0,015	0,55	0,013
Кыштым	Пыль классификатора	3,6	15,4	16,18	0,78	10,5	1,11	0,03	0,01
	Сушильный барабан	3	9,15	16,44	0,72	10,2	1,91	0,03	0,01
Орск	Пыль классификатора	1,6	8,14	33,5	3,13	11,9	0,01	0,24	0,013
	Сушильный барабан	1,4	7,89	33,5	3,02	12,0	0,08	0,25	0,012

Составлено авторами

Данный остаток после извлечения цветных металлов, например, обогатительным способом [23], очевидно, может быть использован в строительной индустрии в качестве добавок для цемента и бетона.

Растворы, полученные при выщелачивании, подвергались дегидратации при температуре 100–150°C. Порошкообразная смесь диоксида кремния и сульфатов металлов отмывались водой при соотношении Т:Ж = 1:3 при 80°C. Осадок отделяли фильтрованием с использованием вакуумного насоса. Отмытый порошок высушивали до постоянной массы в сушильном шкафу.

В таблице 4 представлены показатели полученных образцов диоксида кремния в результате переработки абразивных материалов, а также образец, полученный из шлака комбината «Печенганикель». Как видно из таблицы 4, образцы, полученные из кыштымских материалов, имеют удельную поверхность ниже, вероятно, вследствие более высокого содержания в данных образцах примеси железа (табл. 2). Для отмывки от железа использовалась соляная кислота, которая влияет на величину удельной поверхности [23].

Как видно из таблицы 4, образцы диоксида кремния сопоставимы с порошками диоксида кремния, полученными в результате переработки металлургического шлака комбината «Печенганикель».

Таблица 4

**Параметры образцов SiO<sub>2</sub>, полученных из отходов абразивных материалов**

Отходы абразивных материалов		S <sub>уд</sub> , м <sup>2</sup> /г	d <sub>пор</sub> , нм	V <sub>пор</sub> , см <sup>3</sup> /г
Реж	Циклон	841,5	2,7	0,56
	Газоочистка	608,8	2,4	0,38
Кыштым	Пыль классификатора	461,7	2,4	0,27
	Сушильный барабан	387,6	2,3	0,22
Орск	Пыль классификатора	699,4	2,4	0,41
	Сушильный барабан	811,9	3,0	0,61
Шлак Печенга		796,2	3,0	0,59

Составлено авторами

Высокую удельную поверхность можно объяснить тем, что рН растворов выщелачивания находится в кислой области. При рН ~ 2 скорость полимеризации минимальна. При рН < 2 она увеличивается с ростом концентрации ионов Н<sup>+</sup>, в то время как при рН > 2 она увеличивается с ростом ОН<sup>-</sup>. В щелочной области увеличивается число агрегатов, что приводит к образованию частиц большего размера, а это в свое время вызывает снижение удельной поверхности [24]. Известно, что в присутствии кислоты (например, серной) рН ~ 2 является точкой, в которой образуются наиболее устойчивые гели, имеющие максимальную удельную поверхность. Это связано с минимальными скоростями процессов агрегации и роста первичных частиц, т. е. частицы при рН ~ 2 являются минимальными по размеру [24].

Как видно из таблицы 5, размер пор находится в диапазоне 2,3–3 нм. По Айлеру, частицы, образующиеся в кислой области, малы, т. к., достигая размера 2–4 нм, рост становится незначительным или вовсе прекращается [24]. Также можно сделать вывод, что данные образцы относятся к мезопористым, поскольку размер пор находится в диапазоне 2–50 нм [25].

В таблице 5 представлен состав порошков диоксида кремния, полученных серно кислотным вскрытием отходов абразивных материалов.

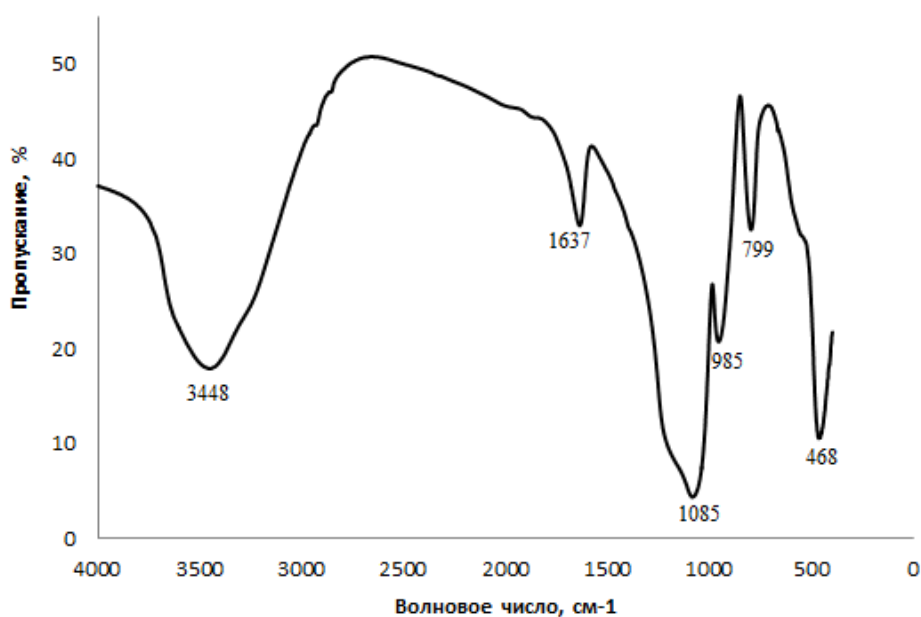
**Таблица 5**

**Состав образцов диоксида кремния**

Отходы абразивных материалов		SiO <sub>2</sub> , %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	TiO <sub>2</sub> , %	S, %	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Реж	Циклон	98,52	0,14	0,33	0,42	0,5	0,09
	Газоочистка	98,34	0,39	0,08	0,83	0,03	0,11
Кыштым	Пыль классификатора	87,26	7,62	0,11	0,75	2,94	1,27
	Сушильный барабан	84,11	9,94	0,09	0,67	3,6	1,06
Орск	Пыль классификатора	96,23	0,14	0,88	1,61	0,19	0,09
	Сушильный барабан	98,5	0,8	0,14	0,11	0,11	0,34

*Составлено авторами*

ИК-спектрометрические исследования образцов диоксида кремния (рис. 3) показали, что спектр соответствует имеющимся в литературе данным [26–29].



**Рисунок 3.** ИК-спектр пропускания SiO<sub>2</sub>, полученного из отходов абразивных материалов (Реж) (составлено авторами)

В области 3 300–3 700 см<sup>-1</sup> проявляются колебания различных силанольных групп наряду с валентными колебаниями адсорбированной воды. Сигнал в области 1 637 см<sup>-1</sup> относится к колебаниям адсорбированной воды. Интенсивная полоса поглощения с сигналом 1 085 см<sup>-1</sup> связана с продольными, поперечными и смешанными колебаниями Si-O-Si-связей. Пик поглощения в области 985 см<sup>-1</sup> соответствует колебаниям связей Si-OH. Полосы в интервалах 799 и 468 см<sup>-1</sup> соответствуют валентным асимметричным колебанием мостикового кислорода Si-O-Si и валентным симметричным колебаниям Si-O-Si.

Кроме ИК-спектрометрических исследований проводился термогравиметрический анализ. Метод дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) позволяет контролировать процессы дегидратации, удаления летучих соединений, выгорания связующих по изменению

массы образцов (рис. 4). На первом этапе происходит удаление физически адсорбированной воды (нагрев от комнатной температуры до 220°C). Потеря массы образца достигает 4,34 %. На втором этапе при более высоких температурах потеря массы достигает 5,98 %. В данном случае происходит дегидроксилирование поверхности с образованием силоксановых мостиков и сопровождающееся выделением воды.

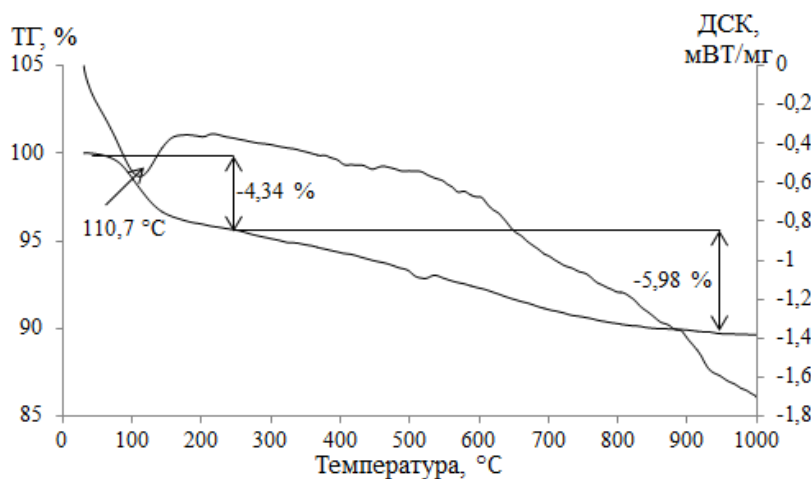


Рисунок 4. ТГ-ДСК кривые  $\text{SiO}_2$  (составлено авторами)

### Выводы

В ходе исследований определен состав отходов абразивных материалов и остатков их выщелачивания.

В результате сернокислотной переработки отходов получены образцы диоксида кремния с величинами удельной поверхности в диапазоне от 387,6 до 841,5  $\text{м}^2/\text{г}$  с размерами пор от 2,3 до 3 нм, что позволяет отнести образцы к мезопористым. Содержание основного компонента в образцах достигает 98 %.

Полученные нерастворимые остатки состоят преимущественно из гипса  $\text{CaSO}_4$ , содержат остатки силиката железа и обогащены цветными металлами, после удаления которых материал может быть использован в стройиндустрии.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Полковникова Ю.А. Использование пористого кремния в качестве перспективного носителя лекарственных веществ / Ю.А. Полковникова // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация. — 2017. — № 4. С. 124–129. — EDN ZVEWKR.
2. Шенцова Е.С. Оценка сорбционных свойств сорбента на основе диоксида кремния / Е.С. Шенцова, Л.И. Лыткина, И.А. Саранов, К.К. Полянский. — DOI: 10.20914/2310-1202-2019-1-269-275. // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. — 2019. — Т. 81, № 1(79). — С. 269–275. — EDN CYDOGS.
3. «Строительные композиционные материалы»: коллективная научная монография; [под ред. Р.М. Ахмеднабиева]. Новосибирск: Изд. «СибАК», 2014. — 232 с.



4. Панов Н.Г. Технология изготовления древесно-стружечных плит с применением аморфного диоксида кремния / Н.Г. Панов, А.В. Питухин, Г.Н. Колесников, С.Б. Васильев. — DOI: 10.15393/j2.art.2016.3261 // Resources and Technology. — 2016. — Т. 13, № 2. — С. 34–44. — EDN WSWUPH.
5. Веляев Ю.О. Перспективы применения аморфного диоксида кремния, полученного из отечественного природного алюмосиликатного сырья в качестве пищевой добавки е551 / Ю.В. Веляев, А.П. Ситак, Н.А. Митрохин, Н.И. Покинтелица, И.А. Прокопенко // Innova. — 2018. — № 4(13). — С. 6–13. URL: [https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-primeneniya-amorfnogo-dioksida-kremniya-poluchennogo-iz-otechestvennogo-prirodnogo-alyumosilikatnogo-syrya-v-kachestve](https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-primeneniya-amorfnogo-dioksida-kremniya-poluchennogo-iz-otechestvennogo-prirodnogo-alyumosilikatnogo-syrya-v-kachestve-pishchevoj-dobavki-e551) (дата обращения: 26.09.2023).
6. Krishnan V., Venkatasubbu D.B., Kalavani T. Investigation of hemolysis and antibacterial analysis of curcumin-loaded mesoporous SiO<sub>2</sub> nanoparticles. Applied Nanoscience 2023, 13. 811–818. doi.org/10.1007/s13204-021-01910-8.
7. Choi M., Choi W.K., Jung C.H., Kim S.B. The surface modification and characterization of SiO<sub>2</sub> nanoparticles for higher foam stability. Sci Rep. 2020, 10. 19399. doi.org/10.1038/s41598-020-76464-w.
8. Snehal S., Lohani P. Silica nanoparticles: Its green synthesis and importance in agriculture. Journal of pharmacognosy and phytochemistry 2018, 7(5). 3383–3393.
9. Кельцев Н.В. Основы адсорбционной техники / Н.В. Кельцев / — М.: Химия, 1976. — 512 с.
10. Колосов А.Д. Технология получения и применения нанокремнезема при производстве новых материалов для машиностроения / А.Д. Колосов, А.А. Немаров, С.А. Небогин — DOI 10.26731/1813-9108.2017.3(55).59-66 // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2017. — № 3(55). — С. 59–66. — EDN ZIBFGT.
11. Barbosa T.S.B., Barros T.R.B., Barbosa T.L.A., Rodrigues M.G.F. Green synthesis for MCM-41 and SBA-15 silica using the waste mother liquor. Silicon 2022, 14, 6233–6243. doi.org/10.1007/s12633-021-01329-4.
12. Marinkov N., Markova-Velichkova M., Gyurov S. et. al. Preparation and characterization of silicagel from silicate solution obtained by autoclave treatment of copper slag. Journal of Sol-Gel Science and Technology 2018, 87. 331–339. doi.org/10.1007/s10971-018-4741-8.
13. Кашапов Н.Ф. Плазменная технология получения аморфного диоксида кремния / Н.Ф. Кашапов, М.М. Ямалеев, Л.Н. Лукашкин, Е.А. Гребенщикова, И.Ю. Гилев, Р.Н. Кашапов, Л.Н. Кашапов — DOI 10.58224/2618-7183-2022-5-5-80-90. // Строительные материалы и изделия. — 2022. — Т. 5, № 5. — С. 80–90. — EDN AITGRF.
14. September L.A., Kheswa N., Seroka N.S., Khotseng L. Green synthesis of silica and silicon from agricultural residue sugarcane bagasse ash — a mini review. RSC Adv 2023, 13. 1370–1380. doi:10.1039/d2ra07490g.
15. Gandara Martinez E., Elizondo Villarreal N., Chavez Coronado K.A. et.al. On the use of Tequila for the biosynthesis of SiO<sub>2</sub> nanoparticles. MRS Advances 2023, 8. 103–107. doi.org/10.1557/s43580-023-00495-4.

16. Koike R., Suzuki R., Katayama K. et.al. Formation dynamics of SiO<sub>2</sub> nanoparticles produced by laser ablation in ambient gases. *Applied Physics A* 2022, 128. 971. doi.org/10.1007/s00339-022-06114-7
17. Zou J., Dai Y., Pan K. et.al. Recovery of silicon from sewage sludge for production of high-purity nano-SiO<sub>2</sub>. *Chemosphere* 2013, 90. 2332–2339. doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.10.087.
18. Пономарев, В.Б. Пневматическая сепарация никелевых шлаков для получения абразивов / В.Б. Пономарев // *Международный научно-исследовательский журнал*. — 2013. — № 10-2(17). — С. 69–70. — EDN RJZBQB.
19. Kasikov, A.G., Shchelokova, E.A., Timoshchik, O.A., Semushin, V.V. Deep Processing of Dump Slag from the Copper-Nickel Industry. *Metals* 2023, 13. 1265. doi.org/10.3390/met13071265.
20. Kasikov, A.G., Shchelokova, E.A., Timoshchik, O.A., Sokolov, A.Y. Utilization of converter slag from nickel production by hydrometallurgical method. *Metals* 2022, 12. 1934. <https://doi.org/10.3390/met12111934>.
21. Ерохин Ю.В. Вещественный состав шлаков Карабашского медеплавильного завода / Ю.В. Ерохин, А.В. Захаров, Л.В. Леонова — DOI 10.18503/1995-2732-2019-17-3-12-18 // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета имени Г.И. Носова*. — 2019. — Т. 17, № 3. — С. 12–18. — EDN BZJTRJ.
22. Ерохин Ю.В. Минералогия шлаков Режевского никелевого завода / Ю.В. Ерохин // *Минералогия техногенеза*. — 2012. — № 13. — С. 50–64. — EDN UDOTET.
23. Тимошик О.А. Комбинированный способ комплексной переработки отвального шлака комбината «Печенганикель» / О.А. Тимошик, Щелокова Е.А., Е.В. Черноусенко. А.Г. Касиков — 10.25702/KSC.2307-5228.2019.11.4.69-74 // *Вестник Кольского научного центра РАН*. — Т. 11, № 4. — С. 69–74. — EDN: DUJYVF.
24. Айлер Р. Химия кремнезема / Р. Айлер /. Пер. с англ. — М.: Мир, 1982. Ч. 1. 416 с., ил.
25. Нефедова Т.Н. Мезопористый кремнезем MCM-48, особенности его синтеза и перспективы применения / Т.Н. Нефедова, Ф. Ресснер, В.Ф. Селеменев — DOI 10.17308/sorpchrom.2020.20/2377 // *Сорбционные и хроматографические процессы*. — 2020. — Т. 20, № 1. — С. 31–39. — EDN SKVDWJ.
26. Huang X., Wang L., Chen J. et al. Effective removal of heavy metals with amino-functionalized silica gel in tea polyphenol extracts. *Journal of Food Measurement and Characterization* 2020, 14. 2134–2144. <https://doi.org/10.1007/s11694-020-00460-x>.
27. Селяев В.П. Свойства и опыт применения диоксида кремния, синтезированного из диатомита / В.П. Селяев, А.К. Осипов, П.В. Селяев, О.В., Ляскин, Е.Л. Кечуткина — DOI: 10.25686/2542-114X.2020.2.7 // *Вестник Поволжского государственного технологического университета*. Сер.: *Материалы. Конструкции. Технологии*. — 2020. — Т. 14, — № 2. — С. 7–19.

28. Rahimzadeh C.Y., Barzinjy A.A., Mohammed A.S., Hamad S.M. Green synthesis of SiO<sub>2</sub> nanoparticles from *Rhus coriaria* L. extract: Comparison with chemically synthesized SiO<sub>2</sub> nanoparticles. PLoS ONE 2022, 17. e0268184. doi.org/10.1371/journal.pone.0268184.
29. Marnikova M., Markova-Velichkova M., Gyurov S. et al. Preparation and characterization of silicagel from silicate solution obtained by autoclave treatment of copper slag. Journal of Sol-Gel Science and Technology 2018, 87. 331–339. <https://doi.org/10.1007/s10971-018-4741-8>.

### **Timoshchik Olga Aleksandrovna**

Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia  
I.V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials  
E-mail: o.timoshchik@ksc.ru  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7890-8308>  
RSCI: [https://www.elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=1084867](https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=1084867)

### **Shchelokova Elena Anatol'evna**

Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia  
I.V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials  
E-mail: e.shchelokova@ksc.ru  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3374-6856>  
RSCI: [https://www.elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=597799](https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=597799)

### **Kasikov Alexandr Georgievich**

Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia  
I.V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials  
E-mail: a.kasikov@ksc.ru  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7694-0910>  
RSCI: [https://www.elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=159023](https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=159023)

## **Obtaining of silicon dioxide from abrasive wastes**

**Abstract.** In the production of abrasive materials from metallurgical slags, fine waste with a size of less than 40 microns is produced, which contains valuable components. Unlike slag, this waste does not need to be pulverized for processing, which greatly simplifies the process. However, without silica extraction, it is impractical to carry out waste treatment. The authors of the work considered the possibility of obtaining silicon dioxide from abrasive wastes of Rezh, Orsk and Kyshtym, containing up to 20,7 % of silicon, up to 31,7 % of iron and up to 0,7 % of the sum of nickel and copper. Sulfuric acid treatment of waste produced a solution containing magnesium and iron (II) sulfates and silicic acid. It was found that during processing of Orsk wastes the degree of components extraction is significantly lower in comparison with Rezh and Kyshtym wastes 24,5, 67,8 and 59,3, respectively. The obtained solution is used to produce silica powders by dehydrating it. The dried mixture is subjected to aqueous washing of metal sulfates. As a result, samples with high specific surface area in the range of 387,6 to 841,5 m<sup>2</sup>/g were obtained. The average pore size is 2,3–3 nm, which allows us to attribute these silicas to mesoporous silica. SiO<sub>2</sub> content in the samples reaches up to 98 %. Samples of silicon dioxide from abrasive materials were compared with that obtained from metallurgical slag of Pechenganickel Combine and have similar parameters. The obtained insoluble leaching residue contains concentrate of non-ferrous metals and according to X-ray data it consists of calcium sulfate, so after separation of non-ferrous metals it can be used in construction industry.

**Keywords:** technogenic wastes; abrasive materials; slag; Ural; hydrometallurgy; leaching; silicon dioxide