

УДК 622.3.45

**СОСТАВ И СВОЙСТВА ВСКРЫШНЫХ ПОРОД УГЛЕДОБЫЧИ ТУВЫ  
И НАПРАВЛЕНИЯ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ**

**Т. В. Сапелкина, Б. К. Кара-сал**

*Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН,  
E-mail: sapelkina\_geotom@mail.ru, ул. Интернациональная, 117а, 667007, г. Кызыл, Россия*

Приведены результаты исследований вскрышных пород, касающиеся объемов их образования, агрегатного состояния, химико-минералогического состава, содержания токсичных элементов, гидравлических, термических и физико-механических свойств, с анализом возможных компонентных составов и технологических режимов получения строительных материалов. Показано, что химический и минеральный составы вскрышных пород угледобычи аналогичны минеральному сырью, содержание токсичных элементов не превышает допустимых концентраций. Согласно модульной классификации, эти породы относятся к группе активных и высокоактивных, являются термически инертными материалами. Комплексная переработка вскрышных пород угледобычи позволяет применять их в качестве сырья для получения теплоизоляционных, керамических, вяжущих и дорожно-строительных материалов.

*Вскрышные породы, отходы угледобычи, аргиллиты, глиежи, песчаники, состав, свойства, строительные материалы*

DOI: 10.15372/FTPRPI20230119

В связи с ограниченными запасами природного минерального сырья многие страны все больше внимания уделяют вовлечению в переработку различных отходов с целью их утилизации и создания безотходных, экологически чистых и ресурсосберегающих технологий для различных отраслей промышленности.

В России ежегодно накапливается порядка 5 млрд т отходов, из которых более 90 % составляют отходы от добычи полезных ископаемых [1]. К одной из разновидностей таких отходов относятся вскрышные породы угледобывающей отрасли, которые представляют собой искусственные массивы — отвалы, занимающие значительные территории. Данные породы характеризуются определенным составом с наличием полезных минералов и компонентов, которые могут быть востребованы в производстве различных видов продукции с минеральной основой, что позволяет использовать их как попутно перерабатываемое сырье. Одно из перспективных направлений применения отходов угледобывающей промышленности — производство строительных материалов.

Развивающимся направлением в переработке вторичного сырья является получение керамических стеновых материалов [2–4], где отходы угледобычи выступают в качестве добавки, улучшающей керамико-технологические свойства смеси и существенно повышающей прочностные характеристики готовых изделий.

По данным других исследователей [5, 6], отходы от добычи и обогащения угля могут применяться как пористые заполнители для бетонов, а также как гидравлические добавки в вяжущих материалах. Практический опыт использования отходов угольной промышленности имеется и в дорожно-строительной отрасли [7–9], что связано с большим потреблением нерудных строительных материалов и их исчерпывающимися запасами. Для установления пригодности и выбора направления в применении отходов угледобывающей промышленности необходимо изучение их состава и свойств [10].

Цель настоящей работы — исследование вскрышных пород угледобычи Тувы: Каа-Хемского, Усть-Элегестского и Чаданского месторождений с определением их химического и минерального составов, содержания токсичных элементов, гидравлических, термических и физико-механических свойств, а также технологичности сырья с возможными направлениями их применения. Рассматриваемые вскрышные породы образовались в результате уплотнения, гидратации и цементации глинистых, кварцевых и полевошпатовых минералов, а также других элементов, отложившихся над угольной толщей, и представляют собой твердые, каменистые отдельности плотной и слоистой структуры.

Объемы образования вскрышных пород на Каа-Хемском угольном месторождении составляют более 40 млн т, на Чаданском — более 30 млн т. На Усть-Элегестском месторождении Тувинская энергетическая компания работает с 2014 г., поэтому объемы вскрышных пород меньше и не превышают 4 млн т. Изучение состояния вскрышных пород в отвалах показало, что отдельные их разности испытывают трансформационные процессы, при которых происходит самовозгорание и разуплотнение, с образованием трещин и распадом на мелкие частицы. В связи с этим вскрышные породы угледобывающих предприятий Тувы можно отнести к продуктам класса “В”, которые образуются в результате длительного хранения и физико-механических процессов, протекающих в отвалах [11].

Основная масса вскрышных пород по гранулометрическому составу в отвалах представлена валунами (40–50%), щебнем (20–25%) с размером частиц 70–1000 мм и 5–70 мм соответственно, а также песчаными частицами. Вскрышные породы имеют разнообразные цветовые оттенки: песчаники — серые и коричневатые, аргиллиты — от светло-серых до темно-серых цветов, глиежи — от оранжевых до красно-коричневых, что обусловлено термическими процессами, протекающими в отвалах.

Для выявления химического состава вскрышных пород использовался метод рентгенофлуоресцентного полуколичественного анализа на энергодисперсионном спектрометре S2 Ranger. Содержание токсичных элементов во вскрышных породах определялось по методике природных нормативных документов (ПНД) Ф 16.1:2.2:2.3:3.36-2002 на атомно-абсорбционном спектрометре Квант-2мт.

Методом рентгенофазового анализа в исследуемых образцах выявлен минеральный состав путем оценки межплоскостных расстояний, выполненный на дифрактометре Дрон-4 (медный анод, напряжение 30 кВ, ток 35 мА). Исследование на содержание углистых примесей в породах угледобычи проведено с помощью дифференциально-термического анализа STA 409 PC/PG Netzsch. Для определения гидравлической активности использовался метод оценки количества поглощенной извести вскрышными породами угледобычи из насыщенного раствора гидроксида кальция  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  с массовой долей 0.13–0.17%, соотношением Т : Ж = 1:15 и продолжительностью от 15 мин до 7 сут.

Основные физико-механические свойства пород установлены по стандартным методикам. Важным показателем, характеризующим любой промышленный отход, является химический состав, который и определяет их дальнейшее направление использования. По результатам хи-

мического анализа рассматриваемые породы угледобычи близки к природному алюмосиликатному сырью, относятся к кремнистым породам с содержанием оксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ) более 50 %, а по содержанию оксида алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) — к кислому сырью (менее 13 %) (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Химический состав вскрышных пород угледобычи

Порода	Содержание оксидов, масс. %							
	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{TiO}_2$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}$
Каа-хемские песчаники	74.55–77.24	6.58–8.01	0.72–1.05	6.53–8.05	3.80–4.50	0.62–0.88	2.88–3.24	0.68–1.03
Усть-элегестские аргиллиты	66.61–69.06	7.87–9.54	1.68–2.02	11.34–14.53	1.12–1.51	1.36–1.50	4.05–4.67	0.80–1.08
Чаданские глиежи	75.44–75.74	6.87–9.44	1.89–1.99	9.10–11.50	0.69–0.96	0.71–1.34	2.14–2.23	0.46–0.47

По сравнению с аргиллитами и глиежами в песчаниках железистые соединения присутствуют в незначительном количестве (6–8 %), но отличаются содержанием щелочноземельного оксида кальция (3–5 %). Щелочные оксиды ( $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ ) в аргиллитах входят в состав глинистых минералов и карбонатов и составляют 5–6 %, что следует рассматривать как среднюю концентрацию для керамического сырья.

Важный показатель промышленных отходов — их токсичность, оцениваемая валовым содержанием токсичных элементов в породе. Полученные результаты содержания токсичных элементов в породах сопоставлены со значениями предельно допустимых концентраций (ПДК) и ориентировочно допустимых концентраций (ОДК) химических веществ по степени токсичности для кислых, суглинистых и глинистых почв (рН КСl менее 5.5) [12, 13]. Из табл. 2 видно, что наличие содержания токсичных элементов в исследуемых породах не превышают ПДК и ОДК.

ТАБЛИЦА 2. Содержание токсичных элементов во вскрышных породах угледобычи, мг/кг

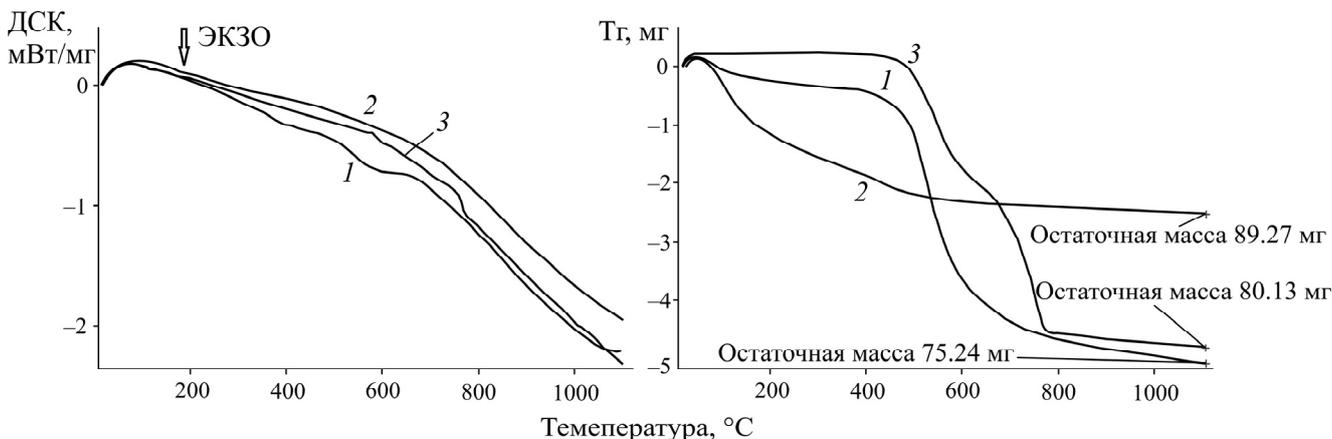
Элемент	Аргиллит	Глиеж	Песчаник	ПДК для почвы с учетом фона/ ОДК, мг/кг
Кадмий	$0.57 \pm 0.19$	$0.32 \pm 0.11$	$0.31 \pm 0.10$	1/2*
Свинец	$5.20 \pm 1.77$	$2.00 \pm 0.68$	$2.31 \pm 0.78$	65/130*
Цинк	$78 \pm 23$	$42 \pm 13$	$41 \pm 12$	110/220*
Медь	$8.0 \pm 2.7$	$12.3 \pm 4.2$	$7.3 \pm 2.5$	66/132*
Никель	$9.9 \pm 3.4$	$13.1 \pm 3.9$	$9.3 \pm 3.2$	40/80*
Марганец	$377 \pm 75$	$227 \pm 45$	$524 \pm 105$	1500
Кобальт	$5.0 \pm 1.7$	$4.3 \pm 1.5$	$3.1 \pm 1.1$	Не опр.

\* Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ для различных групп почв: песчаных и супесчаных, кислых, суглистых и глинистых (рН КСl < 5.5) и близких к нейтральным и нейтральных (рН КСl > 5.5)

Установлено, что вскрышные породы отличаются от традиционного сырья минеральным составом и сложены в основном глинистой составляющей ( $d/n = 10.08, 5.00, 4.49, 3.52, 2.79, 2.56, 2.14, 1.50 \text{ \AA}$ ), зернами кварца ( $d/n = 4.26, 3.35, 2.46, 2.28, 2.24, 2.13, 1.98, 1.82 \text{ \AA}$ ), частицами карбоната ( $d/n = 6.41, 5.94, 4.04, 3.78, 3.62, 3.49, 3.20, 2.90 \text{ \AA}$ ), полевого шпата ( $d/n = 6.78, 6.64, 6.53, 3.96, 3.30, 3.25, 2.16, 1.80 \text{ \AA}$ );  $A$  — межплоскостное расстояние,  $\text{\AA}$ ;  $n$  — порядок отражения ( $n = 1, 2, 3, \dots, n$ ).

Каа-хемские песчаники состоят из мелко-среднезернистого песчаника псаммитовой структуры с содержанием кварца (до 40 %), полевых шпатов (до 20 %) и глинисто-гидролюдистых сланцев (до 30 %). Фазовый состав усть-элегестских аргиллитов представлен кварцем (32–36 %), плагиоклазом (20–24 %) и полевыми шпатами (26–28 %) со следами кальцита и пирита. Чаданские глиежи представляют собой частично переплавленный алевролит с обломками кварца (38–42 %), полевых шпатов (32–34 %) и бурых железистых соединений — гематита.

С целью определения содержания углистых частиц во вскрышных породах проведен дифференциально-термический анализ (рисунок).



Графики ДСК–Тг (дифференциальная сканирующая калориметрия–термогравиметрия) вскрышных пород угледобычи: 1 — аргиллит; 2 — глиеж; 3 — песчаник; ЭКЗО — экзотермический эффект

Установлено, что изменение массы вскрышных пород составляет 3–6% за счет удаления химически связанной воды (при температуре до 500 °С), что характерно для глинистых минералов и карбонатов. Наличие содержания органических веществ проявляется эндотермическими реакциями, происходящими при более высоких температурах (> 500 °С). На ДСК-графиках вскрышных пород эндотермические эффекты четко не выражены, что обусловлено низким содержанием угольных частиц, а полное отсутствие температурных эффектов соответствует перегоревшим глиежам в отвалах.

Вскрышные горелые породы, как и глинистые материалы, обладают гидравлической активностью [14]. Проявление гидравлических свойств обусловлено взаимодействием основных оксидов, вступающих в реакцию с гидроксидом кальция Ca(OH)<sub>2</sub> и образующих соединения гидросиликатов кальция и алюможелезистых соединений, характеризующихся глинистно-железистым модулем:  $M_1 = (Al_2O_3 + Fe_2O_3) / SiO_2$ .

Анализ содержания оксидов SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> до и после известкования показал, что массовое содержание оксида кремния уменьшилось, но увеличилось содержание оксидов алюминия и железа (табл. 3). По показателю глинистно-железистого модуля M<sub>1</sub> глиежи и песчаники относятся к группе активных пород (0.34–0.37%), а аргиллиты характеризуются как высокоактивные породы (M<sub>1</sub> = 0.54 %) [15]. Данные свойства аргиллитов существенны для получения вяжущих веществ, особенно проявляемых активными породами при автоклавной обработке.

ТАБЛИЦА 3. Химический состав вскрышных пород угледобычи после известкования Ca(OH)<sub>2</sub>

Порода	Содержание оксидов, масс. %							
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
Каа-хемские песчаники	65.07	14.25	2.94	8.06	2.94	1.40	2.72	2.62
Усть-элегестские аргиллиты	54.85	18.04	3.64	11.46	3.31	3.05	3.39	2.27
Чаданские глиежи	64.35	14.53	3.31	9.39	4.69	1.16	1.53	1.04

Степень пригодности вскрышных пород в технологических процессах характеризуют их физико-механические свойства [16], представленные в табл. 4.

ТАБЛИЦА 4. Физико-механические свойства вскрышных пород

Порода	Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup>	Пористость, %	Водопоглощение, %	Предел прочности при сжатии $R_{сж}$ , МПа	Коэффициент размягчения $K_p$
Каа-хемские песчаники	2.66	15.4	4.5	72.4	0.92
Усть-элегестские аргиллиты	2.65	10.7	3.8	43.5	0.77
Чаданские глиежи	2.66	17.2	5.1	57.5	0.87

Из вскрышных пород наиболее легкими являются чаданские глиежи с объемной массой 2.21 г/см<sup>3</sup>, более тяжелыми — усть-элегестские аргиллиты (2.37 г/см<sup>3</sup>). Соответственно аргиллиты отличаются низкой пористостью (10.7 %) и имеют наименьшую прочность (43.5 МПа). Значительная пористость глиежей соответствует и росту степени водопоглощения. Каа-хемские песчаники отличаются высокой прочностью при сжатии (более 72.4 МПа). По отношению к воде песчаники и глиежи более водостойкие, так как их коэффициент размягчения превышает 0.80, а глинистые сланцы при длительном увлажнении значительно поглощают воду и становятся менее водостойкими ( $K_{разм} \geq 0.80$ ).

В результате лабораторных исследований установлено, что на основе измельченного песчаника (частицы менее 0.63 мм) — 60 % и цемента — 40 %, а также газообразователей в составе извести и алюминиевой пудры, при соотношении вода/твердое 0.65, получен легкий стеновой материал неавтоклавного твердения — газобетон со средней плотностью 1000–1100 кг/м<sup>3</sup>, пределом прочности при сжатии 7.4–8.1 МПа и теплопроводностью 0.41 Вт/(м·°C) [17].

При сравнении по твердости и прочности с представителями таких пород, как гранит и мрамор ( $R_{сж} > 50$  МПа), исследуемые песчаники им существенно не уступают (табл. 4). Проведенные испытания щебня и отсевов дробления [18, 19], полученных из валунной фракции песчаников при дроблении и фракционировании на дробильно-сортировочном комплексе, показали, что их физико-механические свойства соответствуют ГОСТу, не уступают по качеству нерудным строительным материалам и могут быть использованы в качестве заполнителя подстилающего слоя земляного полотна при строительстве дорог [20].

На основе чаданских глиежей и извести, полученной путем обжига известняка Хайыраканского месторождения при соотношении масс (глиеж — 70 %, известь — 30 %) и пластическом формовании, созданы образцы с объемной массой 1520 кг/м<sup>3</sup>, водопоглощением 17.3 % и связующей способностью 5.84–7.98 МПа. В результате обжига ( $T = 1100$  °C) получен стеновой керамический материал со следующими физико-механическими свойствами: огневая усадка образца 12.5 %, водопоглощение 4.8 %, предел прочности при сжатии 17.3–20.8 МПа [21].

Что касается аргиллитов, то их использование целесообразно в качестве компонента шихты для цементного клинкера, так как способность этих пород набухать при взаимодействии с известью, образуя гелеобразную массу, приводит к кристаллизации и отвердеванию.

## ВЫВОДЫ

Вскрышные породы угледобычи на месторождениях Республики Тыва по химико-минералогическому составу близки к природному алюмосиликатному сырью. Содержание токсичных элементов (Cd, Pb, Zn, Cu, Ni, Mn, Co) находится в количествах, не превышающих показателей предельно и ориентировочно допустимых концентраций. По физико-механическим характеристикам вскрышные породы — термически инертные материалы, обладающие достаточной прочностью, водостойкостью и гидравлической активностью.

Производство теплоизоляционных, керамических стеновых и дорожных материалов из вскрышных пород угледобычи, а также использование их в качестве активной добавки, компонента шихты для вяжущих веществ является актуальной задачей для строительной отрасли Республики Тыва, так как позволит снизить материальные и трудовые затраты в строительном производстве, а также улучшить экологическую обстановку в районах угледобычи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Худякова Л. И. Использование отходов горнодобывающей промышленности в производстве строительных материалов // XXI в. Техносферная безопасность. — 2017. — Т. 2. — № 2 (6). — С. 45–56.
2. Енджиевская И. Г., Василевская Н. Г., Баранова Г. П., Ворошилов И. С. Стеновые материалы на основе горелых пород // Журн. СФУ. Техника и технологии. — 2016. — Т. 9. — № 4. — С. 563–571.
3. Гамалий Е. А., Боченин Б. В. Применение отходов угледобычи в производстве эффективных стеновых материалов // Academia. Архитектура и строительство. — 2009. — № 5. — С. 570–574.
4. Баталин Б. С., Белозерова Т. А., Маховер С. Э., Гайдай М. Ф. Применение отходов угольных шахт в качестве сырья для получения керамического кирпича // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI в. — 2012. — № 10 (165). — С. 23–25.
5. Гамалий Е. А. Горелые породы как активная минеральная добавка в бетон // Вестн. ЮУрГУ. Строительство и архитектура. — 2008. — № 25 (125). — С. 22–27.
6. Дворкин Л. И., Пашков И. А. Строительные материалы из промышленных отходов — Киев: Высш. шк., 1980. — 143 с.
7. Буравчук Н. И., Гурьянова О. В., Пак Г. Н. Использование материалов из горелых пород шахтных отвалов в дорожном строительстве // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. — 2014. — № 1 (176). — С. 75–80.
8. Слободчикова Н. А., Плюта К. В., Дзюгий А. А. Перспективы использования отходов производства и потребления при строительстве, реконструкции и капитальном ремонте автомобильных дорог // Вестн. ИрГТУ. Строительство и архитектура. — 2015. — № 8 (103). — С. 126–132.
9. Капустин Ф. Л., Перепелицын В. А., Пономарев В. Б., Лошкарев А. Б. Повышение эффективности использования отсевов дробления скальных горных пород // ФТПРПИ. — 2017. — № 3. — С. 103–107.
10. Макаров Д. В., Мелконян Р. Г., Суворова О. В., Кумарова В. А. Перспективы использования промышленных отходов для получения керамических строительных материалов // ГИАБ. — 2016. — № 5. — С. 254–281.
11. Боженев П. И. Технология автоклавных материалов. — Л.: Стройиздат, 1978. — 368 с.
12. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве: Гигиенические нормативы ГН 2.1.7.2041-06. — М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. — 15 с.
13. Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве: Гигиенические нормативы ГН 2.1.7.2511-09. — М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. — 11 с.
14. Дмитриев П. П. Известковая активация природных минеральных сорбентов для нефтепродуктов. — Ташкент: ФАН, 1975. — 88 с.
15. Книгина Г. И. Строительные материалы из горелых пород. — М.: Стройиздат, 1996. — 297 с.

16. **Кара-сал Б. К., Саая С. С., Сандан С. А., Сапелкина Т. В.** Физико-механические свойства вскрышных пород угледобычи Тувы // Естественные и технические науки. — 2018. — № 2 (116). — С. 180–184.
17. **Кара-сал Б. К., Сапелкина Т. В., Седен Б. Р.** Вскрышные породы угледобычи в Туве и направления их применения // Материалы республ. науч.-практ. конф. “География Тувы: образование и наука”, Кызыл, 2016. — С. 54–58.
18. **ГОСТ 8269.0-97.** Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний.
19. **ГОСТ 8735-88.** Песок для строительных работ. Методы испытаний.
20. **Сапелкина Т. В.** Возможность использования отходов угледобычи Тувы в дорожном строительстве // Материалы междунар. науч.-практ. конф., посвященной году науки и технологий “Взаимодействие науки, экономики и общества как фактор развития региона”, Кызыл, 2021. — С. 145–149.
21. **Кара-сал Б. К., Сарыг-оол С. М., Хуурак Э. М., Сапелкина Т. В.** Влияние технологических факторов на эксплуатационные свойства силикатного стенового материала на основе горелой породы угледобычи и извести // Естественные и технические науки. — 2020. — № 10 (148). — С. 186–191.

*Поступила в редакцию 09/XI 2022*

*После доработки 23/XII 2022*

*Принята к публикации 19/I 2023*