

УДК 662 : 553.8

Т.В. Посухова¹, С.А. Дорофеев², К.В. Гаранин³, Гао Сяоин⁴

ОТХОДЫ АЛМАЗОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ: МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ И СПОСОБЫ УТИЛИЗАЦИИ

На основании изучения 18 тел кимберлитов в России (Якутская и Архангельская алмазодобывающие провинции) и Китае (провинции Шандун и Ляонин) выделены 4 минералогическо-технологических типа пород. К первому типу отнесены кимберлиты с преобладанием в их составе сапонита (трубки Чидвия и им. Ломоносова), ко второму типу — кимберлиты с повышенным содержанием карбонатов и флогопита (трубки Чернышевская и Ботубинская), к третьему — кимберлиты с преобладанием в их составе серпентина (трубки Снегопадная, Айхал, Дальняя, Удачная), к четвертому — кимберлиты сложного полиминерального состава (трубки Маркока, им. XXIII съезда КПСС, Нурбинская, Мир, кимберлиты Китая). Для каждого типа предложены схемы технологического использования с учетом минерального состава.

Ключевые слова: кимберлит, утилизация отходов, экологические проблемы.

The samples from 18 kimberlitic bodies of Russia (Arkhangelsk & Yakutian provinces) and China (Liaonin & Shandong provinces) were investigated. Proceedings from the received data, all investigated kimberlites were divided into four mineral-technological types: 1 — with prevalence of saponite (Chidviya and Lomonosov); 2 — with high contents of serpentine (Snegopadnaya, Aikhal, Dalnyaya, Udachnaya); 3 — with increased contents of carbonate and phlogopite (Chernyshevskaya and Botuobinskaya); 4 — with a complex mixed structure (Morkoka, 23 s'ezd KPSS, Nurbinskaya, Mir and pipes of China). The circuit of recycling is offered for each of the allocated types of kimberlites.

Key words: kimberlite, environmental problems, recycling of the wastes.

Введение. К важнейшим экологическим проблемам относится разработка приемов утилизации материалов из отвалов при добыче полезных ископаемых, в том числе на территориях месторождений алмаза. Решение этой проблемы может повысить рентабельность отработки месторождений и снизить экологическую нагрузку на окружающую среду. К сожалению, работы, посвященные утилизации отходов алмазодобычи, ограничиваются рассмотрением пород, измененных до глинистой (сапонитовой) фации [Шпилевая, 2008]. Другие типы пород с этой точки зрения детально не изучены.

Анализ литературных данных [Харьков и др., 1998] показывает, что кимберлитовые трубки сложены разными по петрографическим и петрохимическим характеристикам породами. В этих породах могут присутствовать разные минеральные фазы: минералы группы серпентина, слюды, карбонаты, хлориты, оливины, поэтому важно рассмотреть возможные методы утилизации именно такого комплексного минерального сырья. Существует множество работ, посвященных минералогическим, петрохимическим и петрографическим особенностям кимберлитов [Харьков и др., 1998]. Однако эти работы не нацелены на решение проблемы утилизации кимберлитов, так как

в них не учитываются соотношения компонентов в породе, влияющие на ее технологические свойства. Все сказанное определяет актуальность проведения целенаправленных минералогическо-технологических исследований. В случае отработки коренных месторождений алмаза основные отходы представлены вмещающими породами — кимберлитами, поэтому в задачи нашей работы входило выделение минералогическо-технологических типов кимберлитов, а также разработка методов их возможной утилизации.

Технологии отработки месторождений и связанные с ними экологические проблемы. Существуют два традиционных метода добычи алмазов — подземный со строительством шахт и открытый со строительством карьера. Оба метода успешно используются в Африке, Австралии и Якутии. Предпочтение отдается открытому методу, так как его можно реализовать быстрее и с меньшими затратами, однако открытая разработка неизбежно приводит к большим экологическим потерям и сопровождается образованием *большого количества отходов*. Особенность залегания многих кимберлитовых трубок заключается в том, что сверху они перекрыты мощным слоем (до 100 м) рыхлых терригенных отложений. Ежегодно складывается около 5 млрд т вскрышных пород, например,

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра минералогии, доцент, канд. геол.-минер. н.; *e-mail:* tposukhova@mail.ru

² ФГУП ЦНИГРИ, науч. с.; *e-mail:* tsnigri@tsnigri.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии полезных ископаемых, науч. с., канд. геол.-минер. н.; *e-mail:* vgaranin@mail.ru

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра минералогии, аспирант; *e-mail:* gaojie@mail.ru

карьер высокоалмазонасной трубки Мир имеет глубину 520 м, а диаметр 1200 м, в результате огромные площади отчуждаются под складирование больших масс пустой породы. Общий объем вскрышных работ составляет 80 млн т в год. Еще одна проблема заключается в складировании хвостов обогащения. Содержание полезного компонента в рудах очень мало (1 карат на тонну), сопутствующие примеси и пустые породы (хвосты) составляют огромный объем — 750 млн т.

Особенно сложные экологические проблемы возникли в связи с отработкой месторождений в Архангельской алмазонасной провинции (ААП). Месторождение им. М.В. Ломоносова было открыто в 1980 г. В состав месторождения входит 6 сближенных кимберлитовых трубок (Архангельская, им. Карпинского-1, им. Карпинского-2, Пионерская, Поморская и им. Ломоносова), растянувшихся цепочкой на 9,5 км. Общая площадь составляет 28 км². Месторождение находится в непосредственной близости от крупного промышленного центра и рядом с уникальной природоохранной зоной — Поморским заказником. Именно поэтому добыча алмазов в этом районе началась только через 30 лет после открытия месторождения, а в ходе работ по его освоению были испробованы разные нетрадиционные методы добычи.

На первом этапе был опробован метод скважинной гидродобычи (СГД): в пробуренную скважину опускают трубу, на конце которой закреплен гидромонитор, под большим давлением подающий воду, вода разрушает породу и поднимает ее на поверхность. Главное преимущество метода в том, что он требует значительно меньше времени и затрат, чем строительство карьера и шахты. Руда обогащается в несколько раз, так как вымывается глина. Эта технология не требует спуска людей под землю и дает меньше отходов. Подобная схема работ хороша при извлечении рыхлых, слабосвязанных пород и ранее была опробована на Курской магнитной аномалии (КМА) [Тигунов и др., 1995], однако для кимберлитов она оказалась не пригодна [Дробаденко и др., 1999].

Опытные работы проводились на кимберлитовых трубках Снегурочка и им. Ломоносова. Разработку проводили путем поочередного размыва подземных камер диаметром и высотой по 20 м (рис. 1, а), которые связаны с поверхностью центральной и вспомогательными скважинами, необходимыми для завершения размыва. Все скважины пробурены до дна предполагаемой камеры и обсажены стальными трубами. После формирования камеры ее засыпали окатышами из обожженной глины и цементировали

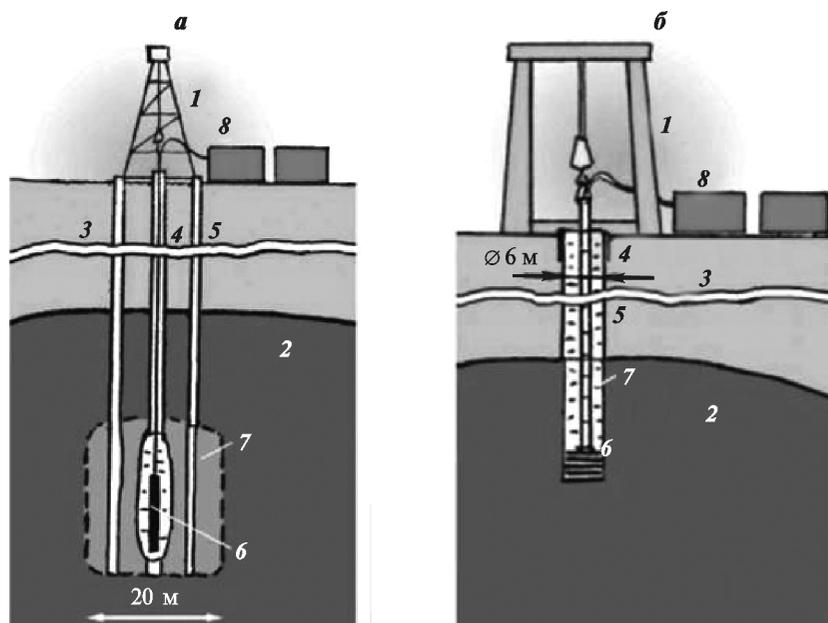


Рис. 1. Схема установок для добычи кимберлита: а — для скважинной гидродобычи: 1 — буровая вышка для спуско-подъемных работ, 2 — тело трубки, 3 — слой наносов, 4 — основная скважина, 5 — вспомогательные скважины, б — гидромонитор в размываемой камере, 7 — проектная камера, 8 — компрессор, буровой насос, энергопитание; б — при выбуривании скважин большого диаметра: 1 — буровая установка, 2 — тело трубки, 3 — слой наносов, 4 — первая обсадная колонна, 5 — вторая обсадная колонна, 6 — скважинный снаряд, 7 — скважина в кимберлите, 8 — модули для насоса, дизелей, бытовой

дно, стенки и свод, так как стенки камеры должны быть устойчивы и не поддаваться размыву. Контроль обеспечивал ультразвуковой гидролокатор. К сожалению, гидроразмыв не удался, и порода на поверхность почти не поступала, всего было поднято менее 10 т.

Была опробована и другая технология — бурение скважин большого диаметра и создание цилиндрических камер на полную глубину трубки с последующим укреплением стенок. На первом этапе пробурили и укрепили скважину глубиной 8 м и диаметром 6 м (рис. 1, б). Затем предполагалось бурение скважины меньшего диаметра на всю толщу рыхлых пород (60 м). После этого можно было начинать добычу, но, к сожалению, в пробуренной части ствола, проходящей через рыхлые отложения, начались обрушения, создалась аварийная ситуация, поэтому бурение пришлось прекратить.

После того как выяснилось, что месторождение придется осваивать традиционным открытым методом, было решено осуществлять разработку месторождения в два этапа. Первый этап (опытно-промышленный) реализован в 2005 г. В 2010 г., объем отработки руды составил 964 тыс. т, а диаметр карьера достиг 650 м при глубине 55 м. На втором этапе предусматривается строительство и ввод в эксплуатацию горнообогатительного комбината (ГОКа) с мощностью 5 млн. т руды в год. Проектные размеры карьера — диаметр 4,5 км, глубина 450 м.

В 1996 г. на территории ААП было открыто новое месторождение алмаза — трубка им. Гриба. Оно находится в 20 км от месторождения им. М.В. Ломо-

носова. В 2010 г. Госкомиссия подтвердила запасы трубки в объеме 98,5 млн карат. Предполагается, что промышленная добыча начнется в конце 2013 г. Планируется разрабатывать трубку в два этапа: за 16 лет открытым способом добудут 58,4 млн каратов, остальные 40 млн каратов — подземным. Мощность ГОКа, который будет построен в районе трубки, составит 4,5 млн т руды в год. По минералогическим и петрографическим характеристикам месторождение им. В. Гриба отличается от месторождения им. М.В. Ломоносова [Гаранин, 2003]. Можно предположить, что в дальнейшем в этом регионе будут выявлены и другие типы кимберлитовых объектов, как это характерно для Якутской алмазонасной провинции и Южной Африки. Очевидно, что разработка таких объектов также будет давать большое количество отходов, и, в отличие от слабозаселенной Якутии, в промышленно развитом регионе вблизи г. Архангельск проблема их утилизации окажется очень острой. Для ее разрешения и разработки новых технологий, помогающих уменьшить количество отходов путем их утилизации, необходимо знать минеральный состав и свойства пород.

Материалы и методы исследования. Проведено детальное исследование минерального состава отходов алмазодобывающей промышленности на примере трех кимберлитовых провинций: Якутской и Архангельской в России и Хуабэй в Китае. По результатам петрографических исследований образцы пород разделены на три класса: кимберлитовые туфы, кимберлитовые брекчии и порфиоровые кимберлиты. Для некоторых образцов определен петрохимический тип кимберлита.

Исследования [Аполлонов и др., 1992; Possoukhova et al., 2000] показывают, что для комплексного минералого-технологического изучения необходимы разнообразные аналитические методы. Изучение минерального состава кимберлитов Якутии проводили на кафедре химии почв МГУ имени М.В. Ломоносова. Исследования образцов из провинции Хуабэй и Архангельской провинции проводили на кафедре минералогии геологического факультета МГУ. *Рентгенодифрактометрический анализ* выполняли на приборе «ДРОН-3»: излучение Cu , фильтровано Ni , напряжение на трубке 30 кВ, сила тока 20 А. Снимали насыпные образцы в кюветах в диапазоне 2θ от 1 до 600 °С и ориентированные образцы на стеклах в диапазоне 2θ от 1 до 150 °С в исходном состоянии, а также после насыщения глицерином и после прокалывания при 350 и 550 °С. Расшифровку проводили вручную по справочным руководствам [Dixon, Schulze, 2002]. *Термический анализ* проводили на дериватографе «Q-1500D» (Венгрия). Нагрев проводили со скоростью 20 °С/мин в диапазоне от 25 до 1000 °С. Навески колебались от 356 до 378 мг, чувствительность весов — 100 мг (аналитик Л.В. Мельчакова). По характеристическим пикам диагностировали карбонаты и силикаты.

Определение карбонатов проводили химическим методом на кальциметре И.Ф. Голубева, метод газометрический и основан на измерении добавочного давления, получаемого от CO_2 , выделяющегося при воздействии HCl на содержащиеся в пробе карбонаты. *Инфракрасную спектроскопию* проводили в диапазоне частот от 400 до 4000 cm^{-1} с точностью $\pm 2 \text{ cm}^{-1}$. Измерения выполняли на порошковых пробах, растертых в вазелиновом масле. Запись спектров осуществлялась на ИК-фурье-спектрометре «ФСМ1201» (ООО «Мониторинг», Россия), а также на спектрофотометрах IR-435 («SHIMADZU», Япония) и «Specord M-80» («Carl Zeiss Jena», Германия) (аналитик — Е.Б. Бушуева).

Изучали сорбционные свойства сапонитовых илов. Активацию илов проводили термическим и термокислотным методами. Предварительно обезвоженные образцы сапонитового ила обрабатывали кипячением в растворах серной и соляной кислот с разной концентрацией из расчета 100 мл раствора кислоты на 10 г образца. Образцы, подвергаемые термокислотной обработке, помещали в колбу с обратным холодильником, заливали раствором кислоты и кипятили на водяной бане в течение 8 ч. После обработки образцы отмывали дистиллированной водой до постоянного значения рН и подвергали сушке при 150 °С в течение 4 ч. Методом тепловой десорбции (адсорбат — азот) измеряли значения удельной поверхности воздушно-сухих и активированных илов. Для всех образцов динамическим методом измерена удельная поверхность по азоту ($S_{\text{уд}}$) и эксикаторным методом — статистические величины общего объема пор по бензолу ($V_{\text{пор}}$).

Особенности минерального состава кимберлитов Якутии. Изучали алмазонасные кимберлиты Малоботуобинского поля, Накынского поля, Далдино-Алаakitского района, для сравнения взяты образцы из непродуктивных трубок (Чернышевская, Дальняя, Загадочная, Снегопадная, Моркока). Отобранные для исследований образцы относятся к разным петрохимическим типам. Породы трубки Айхал относятся к 1-му петрохимическому типу; породы трубки Удачная относятся к 1–6-м петрохимическим типам; породы трубки Мир — к 2 и 4 петрохимическим типам [Шурин, 1995]. Кроме того, образцы были расклассифицированы по петрографическим группам.

К *кимберлитовым туфам* отнесены образцы из трубок Загадочная, Айхал и Снегопадная. Они содержат обломки карбонатных пород, вкрапленники флогопита (до 1 мм), присутствуют псевдоморфозы кальцита и серпентина по оливиному. Цементом служит агрегат серпентина и кальцита.

К *кимберлитовым брекчиям* отнесены образцы из трубок Дальняя, Нюрбинская, Ботуобинская, Мир, им. XXIII съезда КПСС, Чернышевская, Удачная—Западная. Они представляют собой мелко- и среднепорфиоровые породы с повышенным содержанием обломков карбонатных пород (до 20%). Порфиоровые

выделения представлены измененным оливином и выделениями флогопита. Вкрапленники оливина замещены серпентин-карбонатным агрегатом. Связующая масса имеет серпентин-карбонатный состав с неравномерным распределением чешуек хлоритизированного флогопита, перовскита и пылевидного рудного минерала.

К порфировым кимберлитам относятся образцы из трубок Удачная–Восточная и Моркока. Они содержат овоиды измененного оливина, выделения рудных минералов, зерна флогопита и пироксена, сцементированные основной массой карбонат-серпентинового состава. Ксеногенный материал представлен обломками осадочных пород, кристаллических сланцев, реже пород ультраосновного состава.

Таким образом, подобранная коллекция представлена разнообразными породами и достаточно представительна для изучения минералого-технологических характеристик кимберлитового сырья. Анализ результатов рентгенофазового и термического анализа (рис. 2, 3, табл. 1) показывает, что исследованные образцы по особенностям минерального состава можно разделить на 3 группы (табл. 2).

Первая группа — кимберлиты с высоким содержанием серпентина, это образцы из трубок Снегопадная, Айхал, Дальняя, Удачная–Восточная и Удачная–Западная. По интенсивности рефлексов на рентгенограммах (рис. 2) установлено, что преобладают минералы группы серпентина. В небольшом количестве присутствуют хлорит, флогопит и форстерит. Карбонаты представлены кальцитом. Их содержание по данным химического анализа составляет 5–26%. Содержание серпентина составляет 50–91%. Суммарное содержание форстерита, слюды и хлорита в кимберлитах этой группы — 14–24%.

Вторая группа — кимберлиты с повышенным содержанием карбоната и флогопита, это образцы из

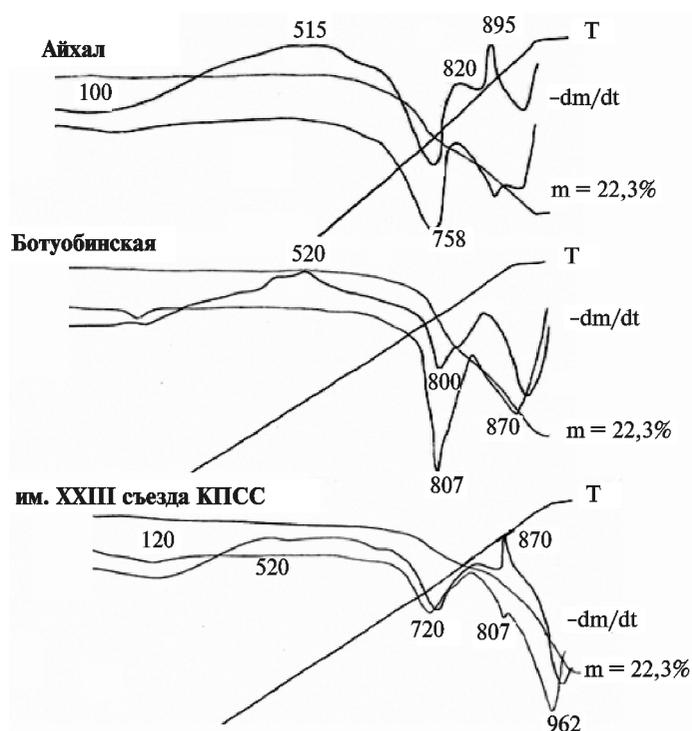


Рис. 2. Результаты термического анализа образцов из кимберлитов Якутии

трубок Чернышевская и Ботуобинская. По данным рентгенофазового анализа (рис. 2) преобладающий минерал — доломит, кроме того, присутствуют флогопит и примесь монтмориллонита. Содержание карбоната кальция по данным химического анализа составляет 36%. По данным термического анализа (рис. 3) содержание доломита варьирует в диапазоне 28–30%. Количество кальцита по данным термического анализа (рис. 3) составляет 24%. Суммарное содержание карбонатов — 47–53%, слюды — 46–47%.

Таблица 1

Результаты термического анализа образцов из кимберлитов Якутии

Трубка	Поле	Петрографический тип	Потеря массы по интервалам температуры (°С), % от исходной навески					Общая потеря массы
			20–200	200–560	560–800	800–870	800–1000	
Загадочная	Далдынское	кимберлитовый туф	0,5	1,7	6,3	13	н.о.	21,5
Чернышевская	Мунское (?)	кимберлитовая брекчия	1,0	2,3	н.о.	10,9	14,6	28,8
Снегопадная	Далдынское	кимберлитовый туф	2	07	93	4,3	н.о.	16,3
Моркока	Моркокинское	порфировый кимберлит	0,9	0,9	н.о.	н.о.	н.о.	25,5
Дальняя	Далдынское	кимберлитовая брекчия	3,4	3,3	9,7	н.о.	н.о.	17,5
Удачная–Восточная	Далдынское	порфировый кимберлит	2,3	2,7	9,4	5,1	н.о.	19,5
Удачная–Западная	Далдынское	кимберлитовая брекчия	0,9	1,0	11,4	8,5	н.о.	21,3
Айхал	Алакит-Мархинское	кимберлитовый туф	0,5	2,2	10,5	9,1	н.о.	22,3
им. XXIII съезда КПСС	Мирнинское	кимберлитовая брекчия	1,1	1,5	8,5	16,3	н.о.	27,4
Мир	Мирнинское	кимберлитовая брекчия	0,7	1,2	5,9	14,4	н.о.	22,2
Нюрбинская	Накынское	кимберлитовая брекчия	1,0	3,3	7,6	5,8	н.о.	17,7
Ботуобинская	Накынское	кимберлитовая брекчия	0,5	0,8	н.о.	10,7	15,7	27,7

* н.о. — не обнаружено.

Таблица 2

Разделение изученных образцов на минералого-технологические типы

Тип	Трубка	Поле	Петрографический тип	Преобладающие минералы	Второстепенные минералы	Содержание карбоната (кальциметрия), %	Содержание карбоната (термический анализ), %	Содержание серпентина (термический анализ), %	Фло-гопит, хлорит, %
1	Чидвия	Ижмозерское	оливиновый мелилитит	монтмориллонит	флогопит, вермикулит, карбонаты, тальк	7	н.о.*	н.о.	н.о.
2	Снегопадная	Далдынское	кимберлитовый туф	серпентин, кальцит, флогопит	хлорит, монтмориллонит	18	10	77	13
2	Айхал	Алакит-Мархинское	кимберлит	серпентин, кальцит	доломит, флогопит, форстерит, хлорит,	27	21	87	
2	Дальняя	Далдынское	кимберлитовая брекчия	серпентин	флогопит, форстерит, кальцит, хлорит	5	н.о.	81	14
2	Удачная-Восточная	Далдынское	порфировый кимберлит	серпентин, кальцит	флогопит, хлорит, форстерит	14	12	78	10
2	Удачная-Западная	Далдынское	кимберлитовая брекчия	серпентин, кальцит	доломит, флогопит, хлорит, форстерит	25	19	91	
3	Чернышевская	Мунское	— " —	доломит, флогопит	монтмориллонит	36	53	н.о.	47
3	Богубобинская	Накынское	кимберлитовая брекчия	доломит, кальцит, флогопит	кварц	47	54	н.о.	46
4	Мир	Мирнинское	— " —	серпентин, кальцит, флогопит, форстерит	хлорит	28	33	50	17
4	Нюрбинская	Накынское	— " —	серпентин, флогопит, кальцит	хлорит	12	13	63	24
4	им. XXIII съезда КПСС	Мирнинское	— " —	серпентин, кальцит	хлорит	38	37	71	н.о.
4	Моркока	Моркокинское	порфировый кимберлит	доломит, серпентин	флогопит, хлорит, магнезит	40	н.о.	н.о.	н.о.
3	Загадочная	Далдынское	кимберлитовый туф	кальцит, серпентин, флогопит	хлорит	26	26	50	24

* н.о. — не обнаружено.

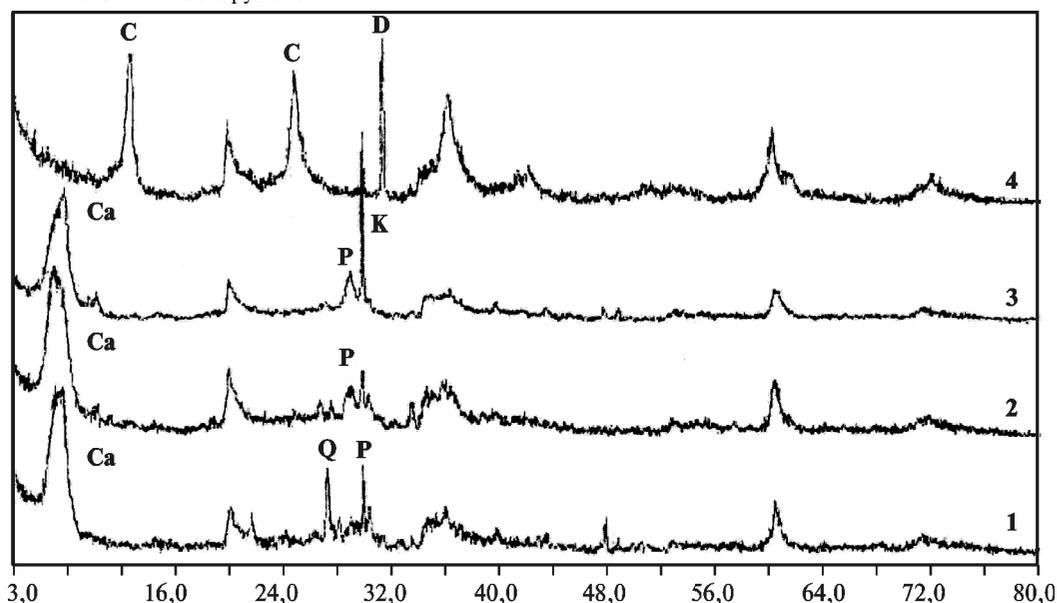


Рис. 3. Результаты рентгенофазового анализа образцов из кимберлитов Архангельской алмазодобывающей провинции: дифрактограммы кимберлитов и оливиновых мелилититов из трубок Чидвия (1), Архангельская (2), им. Ломоносова (3), им. Гриба (4)

Третья группа — образцы со сложным смешанным составом из трубок Моркока, им. XXIII съезда КПСС, Нюрбинская и Мир. По данным рентгенофазового анализа (рис. 2) преобладающие минералы представлены кальцитом, флогопитом и минералами группы серпентина. В небольшом количестве присутствуют минералы группы хлоритов. Содержание карбонатов по данным химического анализа колеблется от 23 до 40%. По данным термического анализа содержание серпентина составляет 50–71%, а карбонатов — 24–37%, слюды и хлорита содержится в сумме 24–26%.

Кимберлиты Архангельской алмазонасной провинции. В качестве эталонных, выбраны и изучены породы из трубки алмаза им. Гриба и месторождения им. М.В. Ломоносова, а также из автолитовой брекчии трубки Чидвия. Трубка им. Гриба сложена автолитовыми брекчиями, ксенотуфобрекчиями и массивным кимберлитом [Кудрявцева и др., 2003]. Установлено преимущественное развитие серпентинизации. Выявлены хризотил, лизардит и антигорит с примесями карбоната и гидроталькита [Гаранин, 2003]. Месторождение им. М.В. Ломоносова представлено несколькими трубками. Автолитовые брекчии трубок Архангельская, Пионерская, им. Ломоносова, им. Карпинского до глубины 450 м сложены псевдоморфозами сапонита по оливину и автолитам связующей массы. Ниже по разрезу основная масса кимберлита замещена серпентином. Присутствуют также кварц, тальк, кальцит. Трубка Чидвия сложена оливиновыми мелилититами, которые практически нацело замещены сапонитом. Локально наблюдаются реликты серпентина, а в центрах псевдоморфоз развивается карбонат [Вержак, Гаранин, 2005]. Проведенные исследования показали, что изученные породы можно разделить на две основные группы.

К первой группе относятся породы с преобладанием сапонита, к ним относятся кимберлитовые

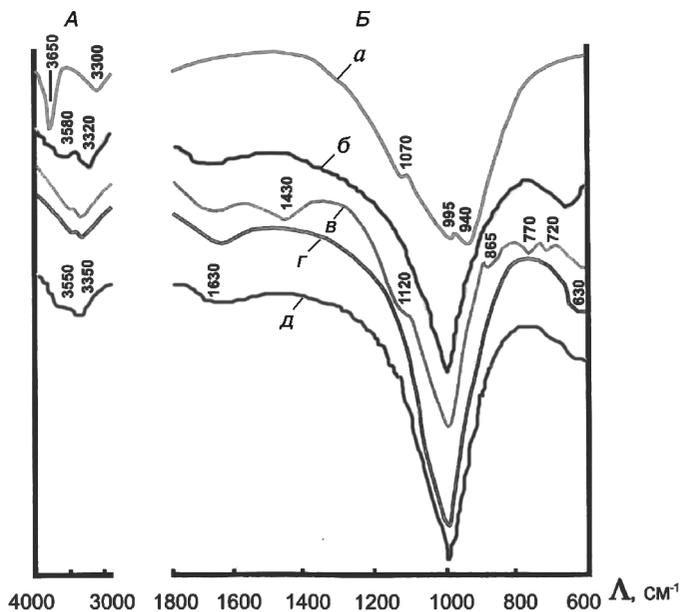


Рис. 4. ИК-спектры образцов из кимберлитов Архангельской алмазонасной провинции: А — глинистая фракция дробленной руды; Б — сапонит из Лавозерского массива (а), усредненная проба трубки Чидвия (б), псевдоморфозы сапонита по оливину из трубки Чидвия (в), из трубки Архангельская (г), и из трубки им. Гриба (д)

брекчии трубок Архангельская, Пионерская, им. Ломоносова и оливиновые мелилититы трубки Чидвия. Эти горные породы состоят из смеси сапонита (85%) и кальцита (10%). Общие потери веса при нагреве до 1000 °С составляют 11,2–12,7%. По данным рентгенофазового анализа сапонит из оливиновых псевдоморфоз не имеет примесей, а сапониты из алевролитовых ксенолитов и из основной массы кимберлитов имеют более сложный состав катионов (рис. 4). По особенностям дифрактограмм и ИК-спектров (рис. 5) установлены три разновидности сапонита: Na-, Ca-Na- и Ca-Mg-сапонит, а также смесь

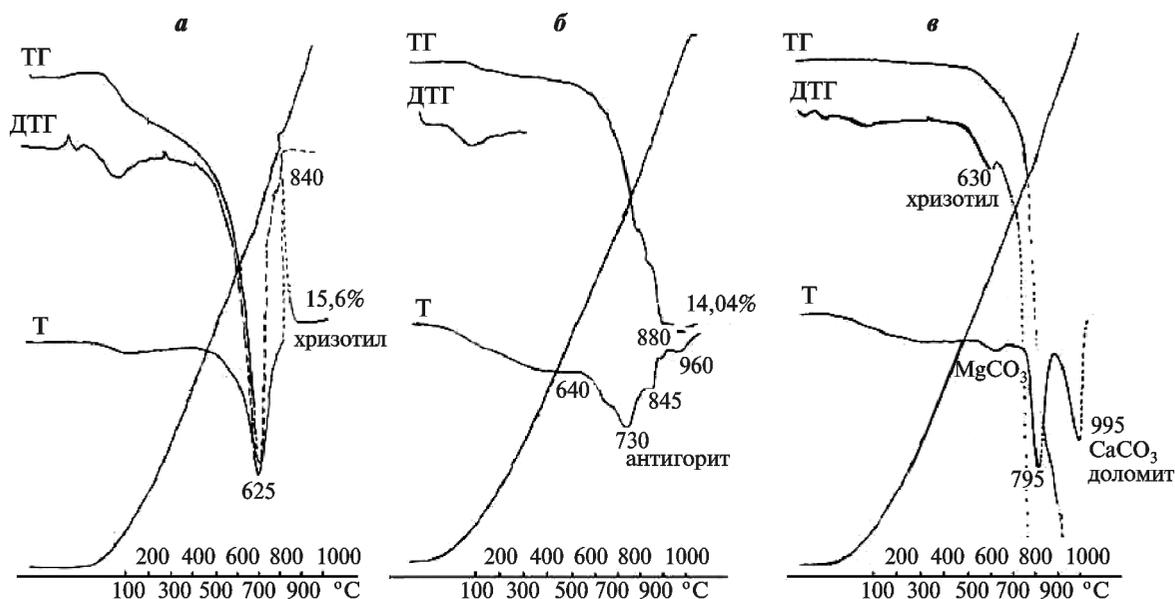


Рис. 5. Результаты термического анализа образцов из кимберлитов Китая: а — трубка Победа-1, б — трубка № 42, в — трубка № 50

политипов разного состава [Аполлонов и др., 2003]. Исследования с помощью энергодисперсионной системы «KEWEX» свидетельствуют о присутствии Na, Ca, Fe, Si и Al [Гаранин, 2003].

Данные рентгенофазового (рис. 4) и термического анализа показывают, что в оливиновом мелилитите трубки Чидвия преобладает Са–Na-сапонит с преобладанием ионов Са и Mg. Также установлено присутствие небольшого количества вермикулита, флогопита и талька. Содержание карбонатов по данным химического анализа составляет 7%. По данным рентгенофазового анализа карбонаты однозначно не диагностируются из-за их низкого содержания и плохой окристаллизованности. ИК-спектр усредненной пробы (рис. 5) также обнаруживает преобладание сапонита и присутствие диагностических полос кальцита и кварца.

К *второй группе* принадлежат породы с преобладанием серпентина. Это кимберлиты трубки им. Гриба, где содержание серпентина достигает 99%, хотя в трубке локально присутствуют участки с повышенным содержанием сапонита. ИК-спектр изученной пробы (рис. 5) полностью идентичен спектру серпентина. Он имеет характерную полосу поглощения в области валентных колебаний Si–O с максимумами 940, 995 см⁻¹, осложненную плечом 1070 см⁻¹. На фоне слабой полосы валентных колебаний OH-групп присутствует интенсивная полоса структурного гидроксила (3650 см⁻¹).

Кимберлиты Китая. Изучены образцы разных петрографических типов пород из 3 алмазонасных трубок: Победа-1, № 42, № 50. Установлено, что главный породообразующий минерал во всех пробах — серпентин с разной степенью изменения и, возможно, состава (по соотношению Mg и Fe). Выявлены различия в составе кимберлитов из 3 трубок. По данным термического анализа и ИК-спектроскопии изученные образцы из кимберлитов Китая можно разделить на 3 группы.

Первая группа — образцы с преобладанием серпентина из трубок Победа-1, № 42 и № 50 (обр. 2 и 3). В трубке Победа-1 основной минерал близок к чистому хризотилу (температура диссоциации 685 °C), а в трубке № 42 — к антигориту (температура диссоциации 730 °C). Лизардит преобладает в образце 50-2, а в образце 50-3 отмечены другие полиморфные модификации (хризотил и антигорит). Различается и его состав (изменяется соотношение Mg и Fe).

Вторая группа — образцы, в которых преобладает карбонат (образец 50-1), много доломита и мало молекулярной воды.

Третья группа — преобладают минералы типа нонтронита, содержащие молекулярную воду (образец 50-3).

Минералого-технологические типы кимберлитов и возможные способы утилизации отходов алмазодобывающей промышленности. Исследования показали, что

кимберлиты в изученной коллекции отличаются по соотношению основных минеральных фаз: сапонита, серпентина, карбонатов и флогопита. Все исследованные образцы кимберлитов из трех изученных провинций по особенностям минерального состава можно разделить на четыре группы (табл. 2).

Первая группа — с преобладанием монтмориллонита, к этому типу относятся образцы из трубки Чидвия и месторождения им. М.В. Ломоносова в Архангельской провинции и обр. № 50-3 из Китая.

Вторая группа — с высоким содержанием серпентина, образцы из трубок Снегопадная, Айхал, Дальняя, Удачная Восточная и Удачная–Западная в Якутии, трубка им. Гриба в Архангельской провинции и трубки Победа-1 и № 42 в Китае.

Третья группа — с повышенным содержанием карбоната и флогопита, образцы из трубок Чернышевская и Ботуобинская в Якутии и обр. № 50-1 из Китая.

Четвертая группа — со сложным смешанным составом, образцы из трубок Моркока, им. XXIII съезда КПСС, Нюрбинская и Мир в Якутии.

Для каждой выделенной группы можно применять разные технологии переработки, что, в соответствии с минеральным составом пород позволяет разделить изученные кимберлиты на минералоготехнологические типы.

Один из важнейших этапов отработки коренных месторождений алмаза — дробление рудной массы. От заданных при этом параметров существенно зависит возможный выход крупных кристаллов алмаза, а переизмельчение пород приводит к потере ценного ювелирного сырья. Одно из перспективных направлений при решении этой задачи — применение метода электроимпульсной дезинтеграции, успешно опробованный на разных типах руд [Гаранин, 2003]. Для максимальной реализации эффекта селективной дезинтеграции руд этим методом необходимо подобрать оптимальные параметры электрических импульсов на основе изучения физико-механических свойств разрушаемых пород.

Влияние минерального состава на физико-механические свойства кимберлитов определяли по петрофизическим параметрам. Результаты (табл. 3) показывают, что породы с разным минеральным составом, существенно различаются и по свойствам. Значения эффективной пористости ($P_{эф}$) и влагоемкости (W) оливинового мелилитита из трубки Чидвия и кимберлитов Золотицкого поля почти в 3 раза больше, чем для кимберлита из трубки им. Гриба. Для пород из трубки им. Гриба характерно более высокое значение электросопротивления (ρ_0). Эти различия связаны главным образом с соотношением сапонита и серпентина в породах. Рыхлая структура агрегатов сапонита и более слабая сила сцепления между ними по сравнению с плотными кристаллитами пластинчатого серпентина — лизардита — во многом определяют величины физических параметров.

Таблица 3

Состав и петрофизические свойства усредненных проб алмазоносных пород из Архангельской алмазоносной провинции

Поле	Трубка, глубина, м	Порода	Породообразующие минералы, %					Прочие минералы, %	Основные минералы	Петрофизические параметры				
			сапонит	кальцит	доломит	кварц	серпентин			$\sigma, 10^{-5}$ ед.СИ	$\sigma, \text{г/см}^3$	$P_{\text{эф}}, \%$	W, %	$\rho_0, \text{Ом}\cdot\text{м}$
Ижмозерское	Чидвия, 300–308	ОМ	90,2	0,5	–	5,0	–	слюда 0,3; пироксен 4,0 (диопсид)	Са–Mg сапонит, кварц	94–117	2,13	19,6	11,6	$\frac{46-70}{50}$
Золотичское	Архангельская, 213	АКБ, вторая группа	94,0	0,3	–	–	–	слюда 1,7; пироксен 4,0 (клинопироксен)	Са–Mg сапонит, пироксен	12–23	2,20	19,9	10,2	$\frac{49-70}{55}$
Золотичское	имени Ломоносова	АКБ, вторая группа	93,7	1,0	–	0,3	–	слюда 1,0; пироксен 4,0 (клинопироксен), гетит	Mg–сапонит, пироксен	20–32	2,11	20,0	12,0	$\frac{48-60}{45}$
Верхотинское	имени Гриба, 160	КМБ, первая группа	–	1,1	28,6	–	70,3	–	серпентин, карбонат	18–22	2,32	6,2	3,0	$\frac{110-180}{130}$

Примечания. ОМ — оливиновый мелилитит; АКБ — автолитовая кимберлитовая брекчия; КМБ — кимберлит; прочерк — минерал отсутствует; петрофизические параметры водонасыщенных кимберлитов измерены при 18 °С; ρ_0 : над чертой — интервал значений, под чертой — среднее значение.

Возможные области применения отходов алмазодобывающей промышленности определяются их минеральным составом.

Породы с высоким содержанием минералов группы серпентина можно использовать при производстве огнеупоров. Обычно в этом качестве применяется только хризотил-асбест. Другие полиморфные разновидности (антигорит и лизардит) образуют скрытокристаллические агрегаты, которые не являются огнеупорами, так как после нагревания до 600 °С разрыхляются [Стрелов, Кашеев, 1996]. Однако при более высоких значениях температуры происходит фазовый переход антигорита в форстерит (рис. 3), а в присутствии кальцита и доломита — в форстерит, окерманит, диопсид и оливин. Такое сочетание компонентов весьма перспективно в качестве основы керамических материалов. Появление окерманита сдерживает рост кристаллов форстерита, что способствует образованию плотных мелкокристаллических структур в материале с низкой анизотропией коэффициента термического расширения [Голдин и др., 1992].

Породы, состоящие преимущественно из карбонатов, можно применять как сырье для производства карбонатного порошка и извести. Карбонатный порошок используется при изготовлении асфальтобетонных смесей [Строкова, Щеглов, 2003] в качестве естественного заполнителя, что позволяет уменьшить расход цемента при сохранении свойств бетонов. Кроме того, такое сырье можно применять в качестве наполнителя в производстве бумаги.

Породы с высоким содержанием карбонатов и флогопита можно использовать в качестве известкующего материала и калийного удобрения. Можно рекомендовать применение пород с высоким содержанием карбонатов и флогопита для создания тепличных грунтов, что особенно важно в условиях северных

территорий. Экспериментально показано, что флогопит благоприятно влияет на режим питания растений калием за счет более продолжительного воздействия и высоких буферных свойств [Dixon, Schulze, 2002; Петербургский, Кузнецов, 1972].

Породы с высоким содержанием минералов группы монтмориллонита применяются в разных технологических процессах как в естественном, так и в активированном виде [Post, 1984; Бондаренко, 2002]. Они служат поглотителями вредных примесей в разных средах, используются для селективного извлечения полезных компонентов, применяются в металлургической промышленности и в промышленности строительных материалов [Лесовик, Гончарова, 2001].

Наши исследования [Аполлонов и др., 1992] показали, что наличие сапонита позволяет использовать пустые породы из ААП для производства строительных материалов. Так, выполнено экспериментальное спекание пустой породы при 1300 °С. После спекания образцов, изготовленных из микрокристаллической основной массы кимберлитов, сформирован материал, который имел эвтектическую микрокристаллическую структуру и состоял из двух минеральной фаз. После спекания образцов, приготовленных из псевдоморфоз по крупным вкрапленникам оливина, образовался однородный материал. Он имеет следующий состав (мас. %): SiO₂ 59,67; TiO₂ 0,01; Al₂O₃ 5,65; Cr₂O₃ 0,10; FeO 6,26; MgO 0,13; CaO 25,70; Na₂O 1,01; K₂O 0,02. Коэффициент расширения составил 3,5. При $T = 1120\text{--}1180$ °С получен пористый материал с насыпной плотностью более 400–450 г/м³. Затем проводились дополнительные испытания с целью получения промышленных материалов из сапонита и с добавками этого минерала [Шпилева, 2008].

В рамках нашей работы мы изучали влияние кислотного активирования на структурные характеристики сапонитовых илов, определяющие их абсорбци-

онную способность. Изучено влияние концентрации кислот и времени активации на интенсивность преобразования свойств исходных илов. Изучали образцы сапонитовых илов из прудов-отстойников обогатительной фабрики. Возраст илов составлял 2–3 года. Мощность илового слоя достигала 1–2 м. Пробы отбирали из разных участков и с разной глубины. После усреднения их высушивали в течение 1 года. В табл. 4 представлены полученные результаты.

Таблица 4

Изменение поверхностных свойств сапонитового ила при термической и кислотной обработке

Номер по порядку	Образец	Температура обработки, °С	Кислота, %	$S_{уд}$, м ² /г	$V_{пор}$, см ³ /г
1	сапонитовый ил воздушно-сухой	комнатная	–	8,3	–
2	сапонитовый ил дегидратированный	150	–	20,6	0,21
3	сапонитовый ил дегидратированный	150	H ₂ SO ₄ , 4,5	320	0,40
4	сапонитовый ил дегидратированный	150	HCl, 5,0	390	0,34

Для каждой кислоты построены зависимости изменения структурных характеристик образцов от времени обработки и концентрации кислоты. В зависимости от условий обработки удельная поверхность возрастает от 8,7 до 250–500 м²/г (практически в 50 раз), а общий объем пор по бензолу — от 0,01 до 0,25–0,45 (почти в 45 раз). Полученные результаты находятся в соответствии с литературными данными для родственных сапониту монтмориллонитовых глин. Отметим, что при использовании серной кислоты высокие значения удельной поверхности достигаются уже через 2 ч независимо от концентрации кислоты, однако увеличение $V_{пор}$ продолжается при обработке до 6 ч, что связано, по-видимому, с увеличением доли мезопор, доступных для адсорбции молекул бензола.

При использовании соляной кислоты наблюдаются иные результаты. Значения $S_{уд}$ и $V_{пор}$ несколько ниже, чем при использовании серной кислоты такой же концентрации, нет четкой закономерности между изменениями значений $S_{уд}$ и $V_{пор}$. Сопоставление полученных результатов с литературными данными (табл. 5) показывает, что исследованные характеристики архангельских сапонитовых илов близки к таковым у некоторых известных природных адсорбентов, например, у монтмориллонитовых глин из промышленных месторождений в СНГ. Результаты опытов свидетельствуют о перспективности адсорбентов на основе сапонитовых отходов для использования их в процессах очистки водных и газовых сред.

Утилизация отходов алмазодобывающей промышленности включает также использование вскрышных пород. Так, выявлена возможность получить стеновые материалы при прессовании шламовых отходов при относительно низком давлении (до 200 кг/см²). Полученные таким образом материалы имеют высокую прочность и морозостойкость [Шпилева, 2008]. Для производства строительных материалов можно использовать вскрышные породы с применением портландцемента в качестве вяжущего компонента [Мартемьянова, Чулкова, 2004].

Результаты исследований показали, что изделия из отходов обогащения кимберлитовых трубок месторождения им. М.В. Ломоносова (плитки размером 120×120×10 мм) обладают красивым узором, высокой прочностью, хорошо поддаются обработке (распиловке и полировке). Эти и другие их свойства (плотность, истираемость, предел прочности, водопоглощение) определяют возможность и экономическую эффективность производства этого вида строительных материалов. Лабораторные испытания с разным соотношением шламовых отходов и песчано-алевролитовых пород в шихте показали, что из смеси определенного состава можно изготовить керамический кирпич методом пластического формования. Показатели пластичности, усадки, плотности, прочности, водопоглощения, морозостойкости, чувствительности к сушке отвечают ГОСТам. Экспериментально выявле-

Таблица 5

Сравнительная характеристика изменения свойств при активации серной и соляной кислотой известных промышленных адсорбентов и сапонитового ила из пород месторождения им. М.В. Ломоносова

Номер по порядку	Образец	Адсорбционная способность по бензолу, мг/г		Удельная поверхность, м ² /г		Объем пор по бензолу, см ³ /г		
		термически активирован при 150 °С	активирован H ₂ SO ₄	не активирован	активирован H ₂ SO ₄	не активирован	активирован H ₂ SO ₄	активирован HCl
1	асканглина			45	210			
2	аскангель			25	115			
3	крымский кил			55	360	0,21	0,61	0,60
4	пыжевский бентонит			46	278	0,20	0,54	0,57
5	сапонитовый ил	104	300	20	320	0,21	0,40	0,34
6	ханларский бентонит	147	312					
7	гумбрин	113	283					

на возможность производства керамзита и пористых заполнителей бетона из отходов алмазодобывающей промышленности [Possoukhova et al., 2000]. В результате исследований получены керамзит, керамзитный гравий, аглопорит, аглопоритовый гравий.

Предварительные расчеты, основанные на лабораторных экспериментах, показывают, что при производстве строительных материалов утилизация шламовых отходов и вскрышных пород возможна в соотношении 5:2 [Гаранин, 2003]. Для трубки Архангельская расчетным путем установлено, что при отработке трубки до глубины 450 м будет извлечено из недр около 68 млн т сапонита. Площадь территории, на которой планируется построить хвостохранилище Ломоносовского ГОКа, оценивается в 9,6 км², а объемом заполнения хвостохранилища в течение 20 лет эксплуатации рассчитан на 116 млн м³ отвальных продуктов обогащения. Очевидно, что за счет вывода из хвостохранилища сапонита и его утилизации площадь изымаемых земель может быть сокращена на 1/3. В случае добычи сырья закрытым способом всю массу породы можно использовать для заполнения пруденных выработок.

Заключение. Предложенная комплексная методика анализа пород, основанная на сочетании петрографических методов, рентгенофазового и термического анализов, ИК-спектроскопии и кальциметрии, оказалась наиболее информативна при выделении минералого-технологических типов кимберлитов. Ее можно рекомендовать для широкого внедрения в производстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аполлонов В.Н., Бершов В.Л., Гаранин В.К. и др. Экологические аспекты минералогического материаловедения (на примере алмазного месторождения имени Ломоносова) // Зап. ВМО. 1992. № 23. С. 1–6.

Аполлонов В.Н., Вержак В.В., Гаранин К.В. и др. Сапонит из месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова // Изв. вузов. Геология и разведка. 2003. № 3. С. 20–37.

Бондаренко А.В. Адсорбционные свойства активированного монтмориллонита: Автореф. канд. дисс. Липецк, 2002.

Вержак Д.В., Гаранин К.В. Алмазные месторождения Архангельской области и экологические проблемы их освоения // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2005. № 6. С. 18–27.

Гаранин К.В. Щелочные ультраосновные магматиты Зимнего берега: их потенциальная алмазонасность и перспективы промышленного освоения: Автореф. канд. дисс. М.: МГУ, 2003.

Голдин Б.А., Фишман М.В., Фишман А.М. Маложелезистые серпентиниты Приполярного Урала — сырье для ювелирной и керамической промышленности. Сыктывкар, 1992.

Дробаденко В.П., Малухин Н.Г., Лев А.М. К вопросу об эффективности гидротранспорта обводненных кимберлитовых руд // Горный журн. 1999. № 5.

Кудрявцева Г.П., Подгаецкий А.В., Гаранин К.В. и др. Минеральный состав и петрофизические свойства ким-

Широкое распространение сапонита в трубках месторождения им. М.В. Ломоносова указывает на возможность рассмотреть отходы его обогащения в качестве техногенных месторождений магнезиальных глин. Это может привести к повышению рентабельности при эксплуатации, сокращению средств на строительство хвостохранилищ и снижению экологической нагрузки на окружающую среду.

Оливиновые мелилититы трубки Чидвия представляют потенциально новый генетический тип месторождений высокомагнезиальных глин, остродефицитного сырья не только в России.

Изучение минерального состава кимберлитов указывает на перспективность применения хвостов обогащения кимберлитовых пород с высоким содержанием магнезиальных глин для производства разных материалов. Лабораторные эксперименты показали возможность изготавливать из такого сырья керамические и прессованные стеновые материалы, стеклокристаллические материалы, керамзит и пористые наполнители бетона, железорудные окатыши, а также использовать в качестве сорбентов и катализаторов. Предварительные расчеты, основанные на лабораторных экспериментах, показывают, что при строительстве средних по мощности предприятий по производству строительных материалов возможна утилизация около 500 тыс. т шламовых отходов и 200 тыс. т вскрышных пород.

Авторы выражают благодарность за помощь, советы и консультации Т.А. Соколовой, И.И. Толпешта и Т.Я. Дроновой, а также А.А. Бурмистрову.

берлитов и родственных им пород Зимнего берега // Изв. вузов. Геология и разведка. 2003. № 3. С. 29–35.

Лесовик В.С., Гончарова М.Ю. Минералогия и петрография сырья для производства строительных материалов и технической керамики. Белгород, 2001.

Мартемьянова З.Н., Чулкова И.Л. Свойства глинистого сырья для производства керамических изделий и пористых заполнителей. Омск: СиБАДИ, 2004.

Петербургский А.В., Кузнецов А.В. Усвоение калия многолетними травами из алюмосиликатов различной степени дисперсности // Агрехимия. 1972. № 3. С. 3–10.

Стрелов К.К., Кащеев И.Д. Теоретические основы технологии огнеупорных материалов. М.: Металлургия, 1996.

Строкова В.В., Шеглов А.Ф. Грунтобетоны на основе глинистых пород КМА для дорожного строительства. Белгород: Изд-во БГТУ им. Е.Г. Шухова, 2003.

Тигунов Л.П., Панков А.В., Бабичев Н.И. Расширение области применения скважинной гидродобычи // Горный журн. 1995. № 1. С. 21–29.

Харьков А.Д., Зинчук Н.Н., Крючков А.И. Коренные месторождения алмазов мира. М.: Недра, 1998.

Шпилевая Д.В. Геологическое строение, минеральный состав и эколого-экономические аспекты освоения трубки Архангельская (месторождение алмазов им. М.В. Ломоносова): Автореф. канд. дисс. М.: МГУ, 2008.

Dixon J.B., Schulze D.G. Soil mineralogy with environmental application. Madison, Wisconsin, 2002.

Ilyin I.P. Petrochemistry of kimberlites of the Siberian platform // 6th Intern. kimberlite conference. Novosibirsk, 1995.

Possoukhova T.V., Apollonov V.N., Garanin V.K. et al. M.V. Lomonosov diamond deposit: ecological problems and

new technologies // Applied Mineralogy in Research, Economy, Technology, Ecology and Culture. Rotterdam: Balkema, 2000. Vol. 1. P. 301–303.

Post J.L. Saponite from near Ballarat, California // Clays and Clay Mineral. 1984. Vol. 32. P. 147–153.

Поступила в редакцию
17.04.2012