

УДК 549+550.2+553+622

Бурцев И.Н., Котова О.Б., Кузьмин Д.В., Машин Д.О., Перовский И.А., Понарядов А.В., Размыслов И.Н., Шушков Д.А. (ИГ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар)

**РОЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
В РАЗВИТИИ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОГО КОМПЛЕКСА  
ТИМАНО-СЕВЕРОУРАЛЬСКОГО РЕГИОНА**

*Рассматриваются актуальные проблемы технологической оценки минерального сырья Тимано-Североуральского региона. Демонстрируется роль научных разработок в развитии и эффективном использовании минерально-сырьевого потенциала региона. Приводятся результаты технологических исследований углей, горючих сланцев, бокситов, титановых руд, промышленных минералов. **Ключевые слова:** Тимано-Североуральский регион, минеральные ресурсы, технологическая оценка, уголь, горючие сланцы, бокситы, титановые руды, цеолиты, промышленные минералы.*

Burtsev I.N., Kotova O.B., Kuzmin D.V., Mashin D.O., Perovskiy I.A., Ponaryadov A.V., Razmyslov I.N., Shushkov D.A. (IG KOMI SC UB RAS, Syktyvkar)

**ROLE OF TECHNOLOGICAL RESEARCHES IN  
DEVELOPMENT OF THE MINERAL RAW MATERIALS  
COMPLEX OF THE TIMAN-NORTH URAL REGION**

*Actual problems of a technological assessment of mineral raw materials of the Timan-North Ural region are considered. The role of scientific developments in development and effective use of mineral resources of the region is shown. Results of technological researches of coals, oil shale, bauxites, titanium ores, industrial minerals are given. **Keywords:** Timan-North Ural region, mineral resources, technological assessment, coal, oil shale, bauxites, titanium ores, zeolites, industrial minerals.*

**Введение**

Добыча и переработка минерального сырья имеют ведущее значение для экономики Тимано-Североуральского региона. В регионе ведется добыча углеводородов, угля, черных и цветных металлов, разнообразных строительных материалов. Межконтинентальными коридорами и транспортными системами регион связывается европейской частью России и зарубежными странами. В средне- и долгосрочной перспективе минерально-сырьевой сектор останется ведущим фактором экономического роста и промышленного развития региона. Поэтому большое внимание должно быть уделено и уделяется промышленной политике и инновационно-технологическим решениям, направленным на рациональное использование минеральных ресурсов. Эти приоритеты зафиксированы в Послании Президента РФ Федеральному собранию РФ (2014,

2015 гг.), «Основах государственной политики в области использования минерального сырья и недропользования», «Долгосрочной государственной программе геологического изучения недр и развития минерально-сырьевой базы России на основе баланса потребления и воспроизводства минерального сырья на период до 2020 года», в проекте «Стратегия развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2030 года» и других документах. О необходимости создания и реализации инновационно-технологических систем во всем минерально-сырьевом комплексе, а также программно-целевых систем воспроизводства минерально-сырьевой базы неоднократно говорилось на всероссийских съездах геологов и на других форумах.

Актуальные проблемы технологической оценки минерального сырья Тимано-Североуральского региона рассматриваются на ежегодных семинарах, проводимых Комиссией по технологической минералогии Всероссийского минералогического общества (Петрозаводск, 2006, 2007, 2008, 2011; Казань, 2009; Сыктывкар, 2010; Москва, 2012; Казань, 2013; Санкт-Петербург, 2014; Белгород, 2015), научных конференциях обогатителей (Плаксинские чтения, конгрессы по обогащению угля и др.). В материалах этих форумов демонстрируются достижения в области обогащения и переработки минерального сырья. Результаты технологических исследований, полученных до 2010 г., отражены в коллективных монографиях и брошюрах, изданных Институтом геологии Коми НЦ УрО РАН [12, 13]. В настоящей работе демонстрируются новые технологические разработки, имеющие потенциал для практического внедрения и определяющие инновационное развитие минерально-сырьевого комплекса Тимано-Североуральского региона.

**Основные результаты исследований**

*Бурые и каменные угли.* Угольные ресурсы региона слагаются из ресурсов пермских углей собственно Печорского угольного бассейна, а также ресурсов верхнедевонских, нижнекаменноугольных и нижнемеловых углей. Но балансом запасов в настоящее время учитываются только запасы и ресурсы пермской угленосной формации.

Бассейн содержит всю гамму углей, обеспечивающих возможность развития сырьевой базы коксохимии, энергетики и нетрадиционных направлений их использования. Наибольшим распространением пользуются бурые и длиннопламенные угли. По запасам каменных углей Печорский бассейн находится на пятом месте в России. По запасам коксующихся углей — на третьем. Более трех четвертей балансовых запасов каменного угля промышленных категорий сосредоточены на четырех месторождениях: Интинском (26,2 %); Воргашорском (23,9 %); Усинском (21,6 %); Воркутском (14,4 %). Большая часть разведанных за-

**Таблица 1**  
**Содержание элементов и микрокомпонентов в интинском угле**

Номер образца	Содержание компонентов, %			Содержание элементов в исходном угле, %				Выход, %	Содержание элементов в обеззоленном угле, %			
	Vt	Lt	It	C	O	H	N		C	O	H	N
248-11	н.д.	н.д.	н.д.	53.0	23.0	4.3	1.0	16	52.7	15.1	5.0	6.0
249-11	н.д.	н.д.	н.д.	73.6	6.0	4.6	2.2	24	77.8	8.8	5.2	5.1
250-11	60	—	40	54.8	15.6	4.1	1.9	31	55.7	14.7	5.5	8.0
251-11	71	4	25	55.1	14.4	4.1	1.8	13	59.3	14.2	4.6	5.8
252-11	88	—	12	62.8	19.7	4.5	1.8	23	52.4	15.8	4.4	6.4
253-11	78	—	22	58.6	15.0	4.2	1.9	17	57.0	14.9	4.0	5.3
254-11	100	—	—	59.8	15.4	4.7	2.0	11	64.6	14.2	4.7	5.3

Примечание: *мацералы угля*: Vt — витринит; Lt — липтинит; It — инертинит, определение выполнено О.С. Котик [10]. Элементный анализ выполнен в ЦКП УрО РАН «Хроматография» (ИБ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар)

пасов приходится на угли марок Ж (38 %), Д (32,55 %), ДГ (11,9 %). Наиболее перспективные для освоения месторождения бурого угля сосредоточены в Шарью-Заостренском районе. В семи крупных месторождениях — Верхнероговском, Ватъярском, Среднеадзвинском, Тальбейском, Шарью-Заостренском, Кушшорском и Неченском содержится 26,4 млрд т, из них кондиционных — 21,0 млрд т. Комплексные исследования, проведенные в ИГ Коми НЦ УрО РАН, позволили обосновать новые перспективы расширения сырьевой базы Печорского угольного бассейна и ее комплексного использования [1, 4].

Перспективы развития угольной отрасли связываются нами не только с ростом объемов добычи, но и с существенным увеличением глубины обогащения углей. Еще в 1990-х годах доказана эффективность гравитационного обогащения углей с использованием винтовых сепараторов [7]. В дальнейшем обоснована целесообразность стадийного дробления-измельчения и обогащения углей, исходя из их минералого-петрографических особенностей, рекомендовалось внедрение методов пневмосепарации, тяжелосредного обогащения в гидроциклонах. Сегодня особое внимание уделяется углехимическому направлению — проводятся исследования по различным вариантам термохимической переработки и получению обеззоленных углей. Последнее направление представляет особый интерес для освоения слабо востребованных месторождений углей низкой и средней степени метаморфизма или качественных, но высокозольных углей, расположенных в удаленных северных и арктических регионах. Обеззоленный уголь — гиперуголь может непосредственно сжигаться в газогенераторных установках, использоваться для газификации, изготовления высокорезакционного кокса, других углеродных материалов для металлургии. По сравнению с другими энергоносителями важным преимуществом гиперугля являются: относительная легкость получения; универсальность применения; высокая эффективность использования на малых станциях и установках. В условиях Крайнего Севера и Арктики эти характеристики позволяют существенно сократить затраты, связанные с сезонным завозом то-

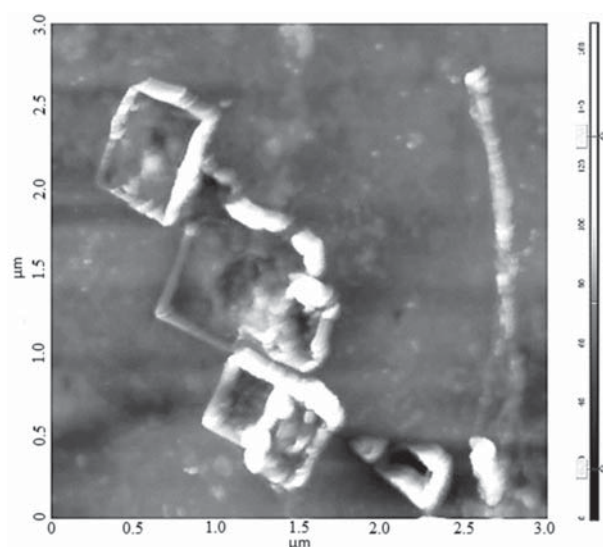
плива, улучшить экологическую обстановку.

В результате проведенных исследований получены хорошие выходы обеззоленных продуктов (5–35 % от исходного) из углей марки ГЖО (Воркутское месторождение), и Б-Д (Неченское месторождение). Сегодня испытаны угли и получены обеззоленные продукты из углей марок Г (газовый уголь Еджид-Кырты), Ж (Воргашорское, Янгарейское месторождения), К (Юньягинское ме-

сторождение), Т (Верхнесырьягинское месторождение), ОС (Хейягинское, Силовское месторождения).

Принципиально важное значение имеет для региона переработка длиннопламенных углей (угли марки Д — Интинского, Д, ДГ — Сейдинского, ДГ — Воргашорского месторождений). Выход целевого продукта из угля марки Д Интинского месторождения (угольные пласти 10 и 11) составляет от 11 до 31 % и имеет отчетливую связь с содержанием компонентов группы витринита (табл. 1).

Кроме оценки углей разного вещественно-петрографического состава и метаморфической преобразованности, нами изучено влияние высокотемпературной обработки на состав и структуру обеззоленного угля. Установлено, что полное разложение органического вещества происходит при температуре 600 °С, при этом формируется макрорельефная поверхность углеродного остатка, а при температуре 400 °С происходит образование кристаллов органического вещества размером до 2 мкм (рис. 1). Данный эффект открывает возмож-



**Рис. 1.** Кристаллы органического вещества, образованные при прокаливании обеззоленного угля. Атомно-силовая микроскопия, ARIS-3500, Burleigh (США)

ности для получения нанокомпозитных материалов на основе гиперугля.

**Горючие сланцы.** Ресурсы горючих сланцев в Тимано-Североуральском регионе (на территории Республики Коми и НАО) составляют свыше 50 млрд т. Добыча и переработка нетрадиционных энергетических ресурсов, какими являются горючие сланцы, характеризуется применением большого числа инновационных технологических решений и создает основу для развития различных отраслей химической промышленности, стройиндустрии.

Наибольшие перспективы для промышленного освоения имеют Чим-Лоптюжское и Айювинское месторождения. На Чим-Лоптюжском месторождении при непосредственном участии и под научно-методическим руководством сотрудников Института геологии Коми НЦ УрО РАН в 2008–2011 гг. проведены разведочные работы (недропользователь — ООО «Рудная Промышленная Компания», г. Сыктывкар), по результатам которых выделены отдельные участки, планируемые к отработке открытым способом (всего 9 участков). Участок Чим Центральный подготовлен к промышленному освоению. Совместно со специалистами ООО «НТЦ-Геотехнология» (г. Челябинск) подготовлено ТЭО разведочных кондиций, выполнен подсчет запасов, которые поставлены на учет государственным балансом (около 100 млн т по кат. С<sub>1</sub>). Общий потенциал запасов месторождения составляет около 900 млн т. Запасы Айювинского месторождения также учитываются государственным балансом (534,3 млн т). Прогнозные ресурсы горючих сланцев Ижемского сланценосного района превышают 3 млрд т. Оба месторождения характеризуются благоприятными географо-экономическими и горнотехническими условиями разработки. На их базе возможно создание крупных энерготехнологических комплексов.

В результате проведенных исследований были решены сложные вопросы выделения в разрезах пластов и отдельных слоев горючих сланцев, их идентификации и корреляции, определены основные геолого-геофизические, горнотехнические и технологические параметры, в том числе средние мощности пластов горючих сланцев, характеристики теплоты сгорания, выхода смолы полукоксования, содержания различных форм серы, установлены особенности распространения в разрезе тяжелых, токсичных и редких металлов. Доказано, что эти характеристики могут использоваться как горнотехнические реперы для идентификации и корреляции пластов горючих сланцев [11]. В подстилающих отложениях впервые выявлена цеолитовая (гейландит-клиноптилолитовая) минерализация, оценива-

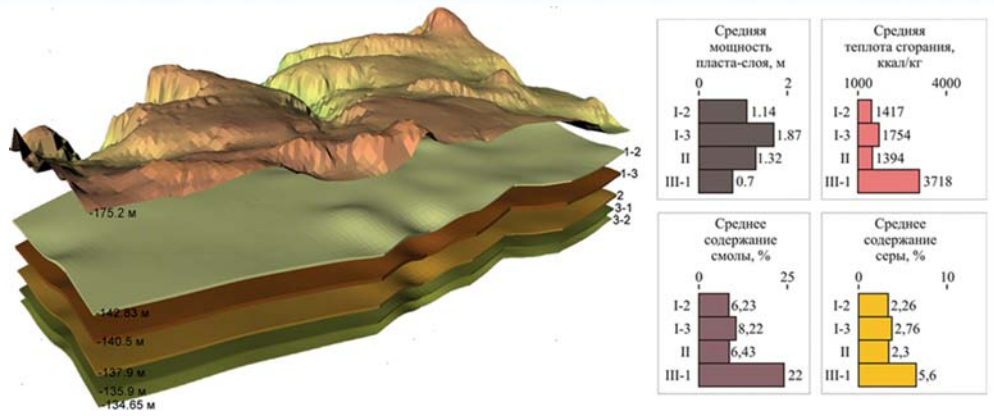


Рис. 2. Горно-геологическая модель и основные характеристики пластов и слоев горючих сланцев Чим-Лоптюжского месторождения

емая по своим масштабам как среднее месторождение. С использованием этих показателей создана горно-геологическая модель месторождения (рис. 2).

Кроме этого, предложены новые технические и технологические решения по бурению скважин и геофизическим исследованиям, проведению вскрышных и выемочных работ, обосновано применение методов крупнокусковой сепарации для повышения качества сланца, утилизации вмещающих пород. Показано, что большой потенциал имеет совместная переработка горючих сланцев и бурых углей по пиролизным технологиям, особенно в установках с твердым теплоносителем. В этом случае эффективно могут перерабатываться как высокозольный уголь и горючие сланцы невысокого качества, так и высокосернистые горючие сланцы. Уголь при такой переработке увеличивает удельную теплоту сгорания смеси, выступает как донор водорода (донором может быть также получаемый из него синтез-газ), его минеральные компоненты участвуют в связывании сернистых соединений, образующихся при пиролизе горючего сланца.

В Тимано-Североуральском регионе принципиально важное значение имеет изучение и освоение крупнейших в России и Европе месторождений бокситов и титана, расположенных в Республике Коми. Крупные и уникальные месторождения (всего около 5 % от количества всех выявленных месторождений) содержат почти 70 % запасов и обеспечивают 50 % добычи минерального сырья в России. Обоснование закономерностей формирования уникальных месторождений, их локализации в геологических структурах, геолого-экономическая оценка имеют важное научно-практическое значение для разработки стратегии и обоснования перспектив развития минерально-сырьевого комплекса Российской Федерации.

**Алюминиевые руды.** Разработка месторождений девонских бокситов в Республике Коми позволила значительно сократить дефицит сырья для производства алюминия в России. Геологические предпосылки не позволяют рассчитывать на значительный прирост ресурсов высококачественного сырья, поэтому в ближайшем будущем будут отрабатываться бокситы худ-

шего качества и нетрадиционные типы сырья. В связи с этим возникают задачи повышения качества сырья, сокращения потерь, вовлечения в добычу и промышленную переработку некондиционных и забалансовых руд, нетрадиционного сырья (высокоглиноземистые сланцы, аллиты и др.).

Детальное изучение минералогии и кристаллохимии бокситов позволило оценить размерные характеристики минеральных частиц и спрогнозировать потери полезного ископаемого, обусловленные изоморфной примесью алюминия в составе минералов железа [15 и др.].

Разработана и опробована методика морфометрического анализа тонкодисперсной составляющей бокситов Вежаю-Ворыквинского месторождения с применением малоуглового рассеяния, которая позволила выявить морфометрические характеристики минеральных зерен субмикронного размера и характер их агрегации. Установлено, что в тонкодисперсной составляющей гематит-шамозит-бемитовых и каолинит-бемитовых бокситов Вежаю-Ворыквинского месторождения преобладают минеральные частицы с размерами от 20 до 40 нм. Более кристаллическими являются образцы каолинит-бемитовых бокситов. С использованием метода Мессбауэра установлены важные кристаллохимические особенности железосодержащих минералов бокситов. В составе минеральных типов бокситов выявлено значительное количество гетита (6–7 %). Наряду с гетитом во всех исследованных пробах всегда обнаруживается гематит. Во всех гетит содержащих образцах наблюдается изоморфное замещение железа алюминием в гетите. Гетит подразделяется на две разновидности — магнитную и суперпарамагнитную. Преобладает магнитный гетит. Суперпарамагнитный характеризуется малым размером частиц < 20 нм. На дифрактограммах гетит не фиксируется ввиду малых размеров частиц. Для гематита также наблюдается изоморфное замещение железа алюминием. Количество изоморфно входящего в гематит алюминия не опускается ниже 7 ат. % от количества железа. Весь гематит на месторождении представлен его Al-гематитовой разновидностью. В гематит-шамозит-бемитовых бокситах большая часть железа входит в Al-гематит, который содержится на уровне 11,9 %, содержание изоморфного алюминия составляет 12 ат. % от количества железа. Это означает, что около 2 % от общего алюминия входит в состав гематита и будет теряться с ним при переработке бокситов. В каолинит-бемитовых бокситах Al-гематит составляет менее 1,3 %, содержание изоморфного алюминия составляет 13 ат. %, потери алюминия составят менее 0,3 %. В гематит-бемитовых бокситах Al-гематит содержится в количестве 17,4 % и подразделяется на два вида: со степенью изоморфного замещения железа алюминием 9 ат. % и более 16 ат. %. Потеря алюминия составит более 2,8 %.

Как резерв для глиноземного производства на перспективу в пределах Ворыквинского рудного поля рассматривалось железоалюминиевое сырье. Оно включает все некондиционные и забалансовые бокситы, высокоглиноземистые и высокожелезистые аллиты, некоторые разновидности бемит-каолининовых глин,

также высокоглиноземистые сланцы паунской свиты, прошедшие предварительные технологические испытания, подтвердившие их принципиальную пригодность для получения глинозема, калийных комплексных удобрений. Породы характеризуются широким распространением, значительными мощностями (до 20–35 м), выдержанным минеральным составом (бемит, гематит, каолинит, иногда примесь шамозита), относительно высокими содержаниями главных полезных компонентов (до 40–47 %  $Al_2O_3$ , 28–32 %  $Fe_2O_3$ ) и малых примесей (галлий, ванадий, скандий, ниобий, редкоземельные элементы). По своим ресурсам железоалюминиевое сырье в 2–2,5 раза превосходит утвержденные запасы глиноземных руд и практически повсеместно доступно открытой разработке. Проведенные минералогические исследования составляют важную основу для оценки реальных перспектив вовлечения железоалюминиевых руд в промышленную переработку.

Доля кремнистых и высококремнистых бокситов на месторождениях Тимана доходит до 40 %. При их обогащении основной задачей является повышение содержания глинозема за счет соответствующего уменьшения доли кремнезема. Проведенные экспериментальные исследования показали пригодность применения для этих целей фторидных технологий. Исследования проведены на пробах бокситов Вежаю-Ворыквинского месторождения, которые были предоставлены ОАО «Боксит Тимана». Исходный боксит представляет собой низкокачественную руду, не используемую в настоящее время из-за низкого кремниевого модуля — 2,8. Обескремнивание такого боксита производилось на базе фтороаммонийного способа по следующей схеме — фторирование при температурах 220 и 300 °С с применением водного выщелачивания. После фтороаммонийной обработки пробы, в целях удаления оксидов железа, была проведена хлоридная обработка полученного продукта. Полученные образцы проанализированы методами дифференциального термического анализа, рентгенофлуоресцентной спектроскопии, электронной микроскопии (табл. 2).

**Таблица 2**  
**Результаты фторидной переработки высококремнистого боксита Вежаю-Ворыквинского месторождения**

Компонент	Содержание компонентов в боксите, %		
	Исходная проба	Фторирование при 300 °С с водным выщелачиванием	Обработка хлоридом аммония
TiO <sub>2</sub>	2.50	3.16	2.99
SiO <sub>2</sub>	18.70	0.11	—
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	51.74	71.35	75.90
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26.27	24.13	19.80
ZrO <sub>2</sub>	0.06	0.03	0.03
CaO	0.46	0.84	0.82
K <sub>2</sub> O	0.27	0.60	0.82
MnO	0.36	0.45	0.42
SrO	0.02	0.02	0.02

Как видно из таблицы, по предложенному способу можно получать продукты с содержанием глинозема свыше 75 % бемитового состава, которые пригодны для непосредственной плавки на алюминий, соответствуют лучшим образцам огнеупорного сырья.

По тому же фтораммонийному способу оценена возможность переработки сложных, комплексных по составу бокситов Заостровского месторождения. Месторождение приурочено к коре выветривания верхнепротерозойских отложений и является комплексным фосфат-бокситовым, в котором верхняя часть продуктивной толщи представлена фосфатсодержащими бокситами, нижняя — фосфорсодержащими аллитами и аргиллитами. Примерно четверть запасов месторождения может быть отработана открытым способом. Для испытаний использовались керновые пробы из рабочих коллекций В.В. Лихачева. По исходному составу проба представляла, по сути, не боксит, а аллит с кремниевым модулем 1.1.

Обескремнивание проводилось с использованием фтораммонийного способа по следующей схеме: фторирование при температурах 220 и 300 °С с применением водного выщелачивания. Результаты также подтвердили высокую эффективность разделения глинозема и кремнезема — полученные образцы содержали 70,65–77,50 %  $Al_2O_3$  и также соответствовали лучшим образцам алюминиевых руд и сырья для огнеупорной промышленности (табл. 3).

Таким образом, по фторидной технологии могут эффективно перерабатываться и бедные бокситы и слабо глиноземистые породы, широко распространенные на Тимане, в границах Республики Коми и Архангельской области.

Соответственно сырьевая база глиноземной отрасли в Тимано-Североуральском регионе может быть существенно расширена (не менее, чем в 2 раза) за счет вовлечения в переработку высококремнистых бокситов девонского и каменноугольного возраста — это известные месторождения на Среднем и Южном Тима-

не, потенциальные объекты на Ижемской площади, месторождения Архангельской области.

Экспериментально обоснованы возможности энергетического воздействия на природное и техногенное алюминиевое сырье для переработки руд и извлечения ценных компонентов. Так, например, в результате лазерной обработки красных шламов и железосодержащих концентратов, полученных из бокситовых руд, происходит перераспределение вещества с концентрацией и агломерацией ценных металлов (золота, платины, гафния, вольфрама, висмута и др.), «невидимых» до обработки [14]. Выделение ценных минералов на границах зерен или обособление в виде микроминеральных фаз позволяет применить в дальнейшем стандартные процедуры обогащения и переработки.

Впервые исследовано влияние термического и радиационно-термического воздействия на ожелезненные бокситы Среднего Тимана с целью улучшения их технологических свойств. Установлено, что в результате нагревания бокситов до 600 °С с выдержкой 60 мин в них происходит полная диссоциация гетита и бемита с образованием соответственно гематита и шпинелида  $\gamma-Al_2O_3$ . Магнитные свойства бокситов при этом не только не улучшаются, но даже несколько ослабляются, вследствие чего уменьшается выход магнитной фракции. В результате радиационно-термического воздействия в бокситах образуются ферромагнитные фазы, что потенциально может существенно улучшить магнитное разделение алюминиевой и железистой компонент, а также позволяет решить задачу селективного извлечения фаз редких и редкоземельных элементов. Для реализации этого благоприятного сценария необходимо осуществить более тонкую деинтеграцию вещества бокситов [5].

*Титановые (лейкоксеновые) руды.* Уникальное Ярегское нефтетитановое месторождение, крупные Пижемское титановое месторождение и Водненское проявление, наряду с другими не выявленными, но прогнозируемыми объектами, образуют гигантскую Тиманскую титаноносную провинцию. Эффективное освоение ее ресурсного потенциала имеет стратегическое значение для Российской Федерации.

Сложные для обогащения и процессов переработки лейкоксеновые руды месторождений Тимана затрудняют ввод месторождений в промышленную эксплуатацию. Они образуют собственный геолого-промышленный тип руд, для которого должна быть разработана уникальная технология переработки. Поэтому разными исследователями коллективами ведутся работы по усовершенствованию известных технологий добычи, обогащения и переработки лейкоксеновых руд.

Исходя из минералогии, структурно-текстурных особенностей руд Ярегско-

**Таблица 3**  
**Результаты фторидной переработки боксита Заостровского месторождения**

Компонент	Содержание компонентов в боксите, %			
	Исходная проба	Фторирование при 220 °С с водным выщелачиванием	Фторирование при 300 °С	Фторирование при 300 °С с водным выщелачиванием
TiO <sub>2</sub>	2.77	4.58	4.53	4.86
SiO <sub>2</sub>	41.74	11.00	0.44	0.11
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	44.92	70.65	77.50	72.35
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.77	12.65	16.20	21.45
ZrO <sub>2</sub>	0.16	0.10	0.32	0.16
CaO	0.19	0.32	0.29	0.33
K <sub>2</sub> O	0.27	0.58	0.57	0.60
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.01	0.10	0.02	0.01
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.05	–	–	–
MnO	0.03	–	–	–
SrO	0.06	0.01	0.10	0.09

го месторождения, нами обосновано применение многостадийной схемы выделения полезного ископаемого из руд и концентратов, включающей доизмельчение флотационного концентрата, обогащение дезинтегрированного материала методами флотации, селективной флокуляции или химическими методами. Для

руд Пижемского месторождения предложены методы крупнокусковой сепарации, магнитно-гравитационно-флотационного обогащения. В последние годы наши усилия сосредоточены на поиске эффективных процессов флотации лейкоксеновых руд, обескремнивания флотационных концентратов, применения механоактивации, использовании сильных магнитных полей для разделения слабомагнитных минералов, получении из титановых концентратов продуктов с высокой добавленной стоимостью.

Так, в результате тестовых экспериментов по флотации руд установлено, что при уменьшении pH среды в диффузном слое двойного диэлектрического слоя поверхности рутила (преобладающей минеральной фазы в лейкоксене) концентрируются гидрофобные жирнокислотные остатки, что приводит к увеличению выхода пенного продукта (с 10 % при pH = 7 до 80 % при pH = 4). При повышении температуры суспензии за счет снижения вязкости водонерастворимых реагентов и повышения их адгезии на поверхности твердых частиц происходит увеличение содержания в пенном продукте диоксида титана. Сепарация в сильномагнитных полях позволяет решить проблему разделения минералов со слабоконтрастными свойствами. Для этих целей была разработана и изготовлена лабораторная модель высокоградиентного электромагнитного сепаратора.

Интерес представляет применение фторидных технологий для переработки лейкоксеновых концентратов. На этапе обогащения фториды могут быть успешно применены в целях десиликфикации и подготовки поверхности частиц к флотации. На этапе глубокой химической переработки руд фториды могут быть применены для получения из черновых лейкоксеновых концентратов высококачественного искусственного рутила. Для титановых руд, особенно смешанных и нетрадиционных типов, использование фторидных комплексов является едва ли не единственным вариантом решения дилеммы, связанной с выбором серно-кислотного или хлоридного способа получения пигментного диоксида титана. Уровень современного аппаратного оформления и опыт использования, полученный в атомной промышленности и в других отраслях, позволяют утверждать, что фторирующие реагенты могут вполне безопасно использоваться в циклах переработки и утилизации минерального сырья. Положительным фактором также является воз-

**Таблица 4**  
**Химический состав продуктов обескремнивания лейкоксенового концентрата**

Образец	Содержание оксидов, масс. %									
	TiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SrO
Исходный	81.21	6.47	7.82	1.89	1.51	0.69	0.17	0.05	0.17	0.02
Однократная дезинтеграция	85.24	1.97	8.52	1.91	1.48	0.41	0.19	0.06	0.20	0.02
Двукратная дезинтеграция	85.82	1.35	8.56	2.12	1.21	0.44	0.23	0.06	0.19	0.02
Центробежное истирание	83.33	3.31	8.46	1.72	2.06	0.68	0.13	0.09	0.18	0.04

можность их полной регенерации и возврата в процесс (замкнутый цикл использования). Тестовые попытки использовать фториды для обогащения лейкоксеновых руд уже были. В Гиредмете изучен процесс прямой флотации кварца из чернового кварц-лейкоксенового (50 % TiO<sub>2</sub>) и обогащенного лейкоксенового концентратов (68 % TiO<sub>2</sub>) после их предварительной обработки плавиковой кислотой и доизмельчения до крупности –20 мкм. Разработана технологическая схема обогащения чернового кварц-лейкоксенового концентрата и обогащенного лейкоксенового концентрата с флотацией кварца в щелочной среде, обеспечивающие получение рутилового концентрата с содержанием 80 % TiO<sub>2</sub>. Исследован процесс дальнейшего удаления кварца путем низкотемпературной обработки концентрата фторидными солями и возгонки кремния. Получен искусственный рутил, содержащий 92–94 % TiO<sub>2</sub>.

Нами предлагается более простой и более эффективный способ с использованием в качестве фторирующего реагента гидрофторида аммония [8]. Полученные по разработанному способу титановые концентраты являются аналогами природного и искусственного рутила и пригодны для переработки в пигментный диоксид титана по хлоридному способу или по фторидной технологии (аналогично предложенной в патенте № RU 2392229). Такой концентрат востребован во многих других областях применения как компонент в керамических массах для обмазки электродов, композитных материалах. Также возможно получение непосредственно порошкового металлического титана высокой чистоты (путем электролитического восстановления титана из фторидной соли, например, по способу № RU 2466216).

Одной из задач проведенных технологических исследований являлось изучение влияния механоактивации на повышение эффективности химической переработки. Установлено, что при тонком измельчении лейкоксенового концентрата его реакционная способность увеличивается. При его фторировании образование промежуточных продуктов смещено в более низкотемпературную область (ниже примерно на 20 °С по сравнению с исходным материалом). Дополнительная термообработка полученных порошков при температуре в 350 °С позволяет зафиксировать титановые фазы в форме рутила (табл. 4).

Реализация предложенной технологической схемы позволяет получать попутно синтетический диоксид кремния высокой чистоты. В поисковых опытах нами

**Таблица 5**  
**Сорбция и прочность сорбции естественных радионуклидов ситинакитом**

Радионуклид	Исходное содержание радионуклида в растворе, г	Содержание в растворе после экспозиции, г	Степень извлечения, %	Степень десорбции, % от поглощенного количества		
				Дистил. водой	1М ацетатом аммония	1 М соляной кислотой
Торий-232	$8.45 \cdot 10^{-6}$	$1.51 \cdot 10^{-6}$	82.1	1.6	4.7	55.2
Уран-238	$11.30 \cdot 10^{-6}$	$0.14 \cdot 10^{-6}$	98.8	0.4	0.7	60.3
Радий-226	$7.29 \cdot 10^{-10}$	$0.09 \cdot 10^{-10}$	98.8	0.75	0.05	28.4

был получен продукт с содержанием  $\text{SiO}_2$  99,968 %. По своим параметрам полученный продукт не отличается от известных на мировом рынке продуктов — zeosil французской компании Rhodia, и превосходит наноструктурированный оксид кремния, предполагаемый к производству компанией ООО «Русский магний».

К 2025 г. спрос шинной промышленности в оксиде кремния составит 25–30 тыс. т, другие отрасли будут потреблять около 25 тыс. т. ОАО «ЯрегаРуда» планирует производить на Ярегском ГХК аморфный диоксид кремния — аэросил марок Ам–10, Ам–20, А–30, отвечающий по качеству маркам крупнейших мировых производителей (фирмы Degussa и Wacker). Объем производства — 3–5 тыс. т/год каждой марки. Предлагаемая нами технология основана на более простом и более дешевом способе производства востребованной на рынке высококачественной продукции.

Предложенные технологические решения могут стать основой для базовой технологии переработки лейкоксеновых руд. Она может быть эффективно встроена как отдельный цикл производства высококачественного титанового концентрата в любой из существующих проектов освоения месторождения (проект ООО «Лукойл–Коми» и ЗАО «СИТТЕК» и проект ОАО «Ярега–Руда»). Поисковыми опытами доказана возможность переработки по фторидной технологии титановых руд Пижемского месторождения (проект ОАО «Русминресурсы» и ЗАО «Руститан»).

В процессе реализации любой технологии глубокого обогащения ярегских лейкоксеновых концентратов получают значительные объемы (от 25 до 40 % от исходного) промежуточных продуктов — кремнисто-титановых концентратов. Это относительно дешевые продукты, которые предшественниками предлагалось использовать главным образом для изготовления силикатных красок. Такие кремнисто-титановые продукты образуются и в ходе фтораммонийного обескремнивания лейкоксеновых концентратов. В ходе проведенных исследований найдено решение, позволяющее получать из них высокоценные продукты — микропористые титаносиликаты, представляющие собой новый класс перспективных материалов, обладающих уникальными свойствами [9]. Среди титаносиликатов широкую известность получили ETS-4, ETS-10, IE-911, являющиеся синтетическими аналогами природных минералов зорита и ситинакита, открытых в Хибинском и Ловозерском щелочных комплексах. Титаносиликаты нашли применение как высокоэффективные

микропористые сорбенты ряда радионуклидов, тяжелых металлов и других опасных загрязнителей. Причем для отходов с европием титаносиликаты выступают в качестве практически единственного эффективного сорбента.

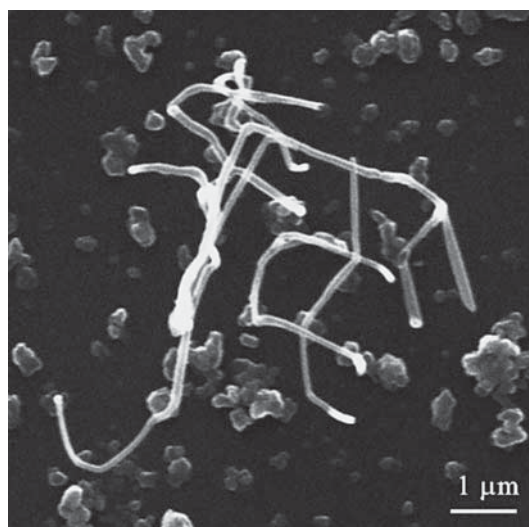
Разработана схема гидротермального синтеза щелочного титаносиликата каркасного строения со структурой ситинакита с использованием в качестве прекурсоров кремнисто-титановых концентратов, полученных при переработке лейкоксеновой руды Ярегского месторождения.

Установлена сорбционная активность синтезированного титаносиликата по отношению к катионам стронция ( $\text{Sr}^{2+}$ ) и аммония ( $\text{NH}_4^+$ ), а также ряда радионуклидов (тория, радия, урана) (табл. 5).

Из данных таблицы видно, что катионы радия прочно удерживаются синтезированным титаносиликатом. А эффект постепенной перекристаллизации ситинакита в безводный титанат позволяет рассматривать продукты адсорбции на ситинаките как удобные титановые матрицы для долговременного захоронения радиоактивных отходов.

Высокая стоимость наночастиц  $\text{TiO}_2$  и их востребованность в промышленности определяют актуальность синтеза нанотрубок диоксида титана из недорогого минерального сырья. Нанотрубки диоксида титана были синтезированы нами гидротермальным методом непосредственно из лейкоксеновых концентратов Пижемского месторождения [4]. Синтезированные нанотрубки имеют диаметр 70–100 нм, длину 2000–4500 нм, обладают развитой поверхностью и хорошими сорбционными характеристиками (рис. 3).

Природные и синтетические титановые минералы являются перспективными фотокатализаторами. Про-



**Рис. 3.** Нанотрубки диоксида титана

ведены исследования по очистке воды от хлорсодержащих загрязнителей (трихлорфенола) с применением в качестве активного фотокатализатора как лейкоксена (Пижемское месторождение), так и полученного из него рутила, в том числе с нанесенными частицами платины. Установлены факторы, определяющие фотокаталитическую активность образцов (степень измельчения; присутствие на поверхности образцов частиц благородных металлов).

*Промышленные минералы.* Значительный объем исследований выполнен в области технологической оценки природных и синтетических цеолитов, химически чистых известняков, доломитов.

Цеолиты являются перспективным видом промышленного минерального сырья, не вовлеченного в сферу широкого индустриального использования в регионе. В пределах Коинской площади выявлено проявление «Весляна», являющееся одним из наиболее перспективных объектов для освоения. Цеолиты Коинской площади представлены преимущественно анальцимом. Этот тип низкремнистых цеолитов еще слабо изучен. Также практически не изучены цеолиты гейландит-клиноптилолитового типа, выявленные в ходе геологоразведочных работ на Чим-Лоптюгском месторождении горючих сланцев.

Цеолиты являются перспективным природным материалом для использования в качестве сорбентов. Ионообменная емкость анальцимсодержащих пород варьирует в интервале от 28,7 до 195 мг-экв/100 г, анальцима — от 16,5 до 21,5 мг-экв/100 г. Проведены исследования по очистке вод, используемых для водоснабжения г. Сыктывкар (водозабор на р. Вычегда). Установлено, что анальцимсодержащая порода способна заметно снизить содержание железа в воде, перманганатная окисляемость увеличивается с 3,77 до 9,49 мг/дм<sup>3</sup>. Зафиксированы высокие адсорбционные свойства по отношению к нефтепродуктам и поверхностно-активным веществам [17].

Установлена сорбционная активность цеолитсодержащих пород в отношении радионуклидов (радия, урана, тория). Степень поглощения тория анальцимолитами и гейландит-клиноптилолитовой породой составляет 100 %. Анальцим проявляет высокие сорбционные свойства только по отношению к торию, в то время как поглощение радия и урана значительно ниже (64,2 и 55,4 % соответственно). Гейландит-клиноптилолитсодержащие породы практически полностью сорбируют торий и радий, однако извлечение урана из раствора протекает хуже и варьирует от 71,3 до 80,8 %. Что касается прочности поглощения, то наиболее прочно удерживается торий, для которого наблюдается лишь незначительное извлечение в раствор при взаимодействии с водой и ацетатом аммония. Анальцим гораздо прочнее поглощает уран. Слабая прочность поглощения радия вызвана его склонностью к ионному обмену, в результате чего в раствор переходит около 50 % поглощенного гейландит-клиноптилолитовыми породами радионуклида, а в случае анальцима извлечение составляет более 60 % [3].

Таким образом, в Республике Коми имеется доступный, дешевый и эффективный источник природного сырья для решения разнообразных экологических проблем, в том числе связанных с реабилитацией радиационно загрязненных территорий в пос. Водный.

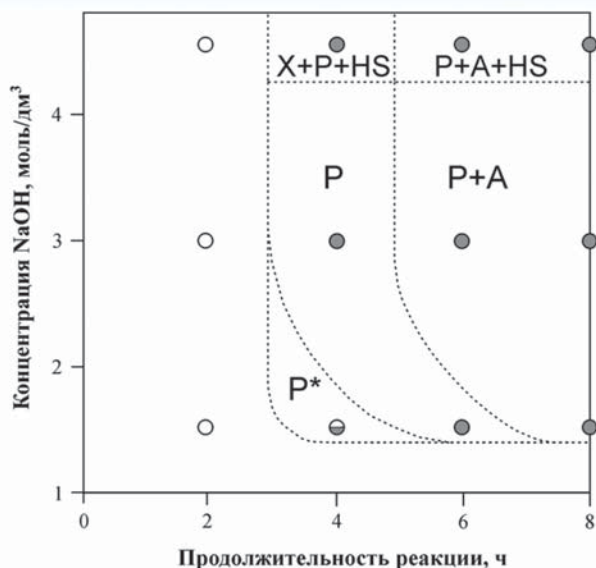
Для улучшения физико-химических свойств цеолитсодержащие породы могут быть дополнительно активированы с помощью механического, термического воздействия и кислотной обработки. При термической обработке в диапазоне температур от 100 до 900 °С оптимальной для данных пород является температура прокаливания 450–500 °С, при которых удельная площадь поверхности и обменной емкости возрастает в 1,9 и 1,25 раза соответственно. Эксперименты по механоактивации продолжительностью от 20 сек. до 20 мин показали, что оптимальным является 2-х минутная активация, в результате которой происходит увеличение удельной площади поверхности в 1,5 раза и обменной емкости в 1,2 раза. Также эффективна кислотная обработка цеолитов (растворами соляной, серной, азотной кислоты). При обработке 5 и 10 %-ной соляной кислотой удельная поверхность увеличивается в 2 и 3 раза соответственно, а катионообменная емкость в 1,3–1,35 раза.

Одним из крупнотоннажных потребителей продукции на основе природных цеолитов является строительная индустрия. Основными мероприятиями «Стратегии развития промышленности строительных материалов на период до 2020 года и дальнейшую перспективу до 2030 года» предусмотрено расширение источников и увеличение объемов производства эффективных теплоизоляционных материалов. Из анальцимолитов и гейландит-клиноптилолитсодержащих пород получены пенокристаллические материалы насыпной плотностью 260–280 кг/м<sup>3</sup>.

Особый интерес представляет получение синтетических цеолитов из техногенных и горнопромышленных отходов. Из летучей золы, образующейся при сжигании углей Печорского бассейна на теплоэлектростанциях, синтезированы следующие цеолиты: анальцим; цеолиты типа фожазита (NaX) и жисмондина (NaP) [6, 16]. Выявлены условия синтеза, которые влияют на тип цеолита, построена схематичная диаграмма кристаллизации (рис. 4).

Большой спрос в регионе имеет продукция на основе высокомагнезиального сырья. Его источники разнообразны — химически чистые доломиты на Тимане, ультраосновные породы на Урале. Проведенные минералого-технологические исследования доломитов значительно расширили область возможного практического применения добываемого карбонатного сырья. Было установлено, что по всем параметрам доломиты месторождения пригодны для использования их в металлургическом производстве в качестве флюсового сырья. Перспективные потребители такого сырья — металлургические комбинаты Урала и центральных районов России (Мечел, Северсталь, Новоліпецкий МК). Доломиты иссле-

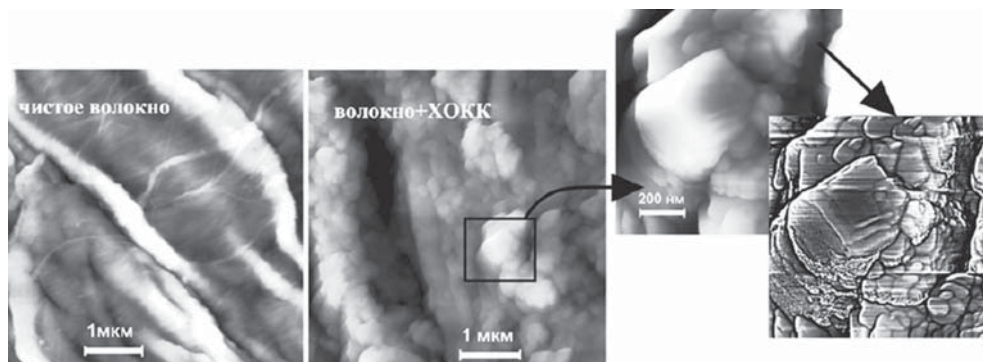




**Рис. 4.** Схематическая диаграмма кристаллизации цеолитов из летучей золы при различной продолжительности гидротермальной реакции и концентрации NaOH: X — цеолит фожазитового типа, P — цеолит жисмондинового типа, A — анальцит, HS — гидроксисодалит. В точках, отмеченных белыми кружками, цеолитовых фаз не обнаружено; P\* — на дифрактограмме наблюдаются слабые пики, возможно принадлежащие цеолиту жисмондинового типа

дованных нами месторождений также пригодны для производства магнезиальных вяжущих. Магнезиальные оксихлоридные цементы обладают высокой прочностью, что обуславливает их широкое применение в строительстве. В состав магнезиальных оксихлоридных цементов входит обожженный тонкомолотый магнезитовый порошок и раствор хлорида магния. Замена дефицитного и дорогостоящего магнезита на обожженный доломит дает возможность получать дешевые строительные материалы без потери их потребительских качеств. Это позволит создать высокоэффективные заменители строительным материалам на органическом вяжущем — древесноволокнистым, древесностружечным плитам, аналогов плитам Greenboard и др.

В регионе подготовлена крупная сырьевая база химически чистых известняков. К месторождениям химически чистых известняков проявляют интерес многие производители бумаги и минеральных наполнителей. Химически осажденный карбонат кальция (ХОКК), получаемый чаще всего из известняков, рассматривается сегодня как неотъемлемый компонент мирового рынка вместе с железной рудой, нефтью и углем. В странах ЕС химически чистые известняки относятся к числу стратегически важных для экономики видов минерального сырья.



**Рис. 5.** АСМ-изображения композиции «Целлюлоза-ХОКК»

Модернизация целлюлозно-бумажных комбинатов и других производств в России объясняют рост объемов потребления дисперсных марок карбоната кальция. С 2003 г. работает завод компании Отуа (Швейцария) мощностью 80 тыс. т/год при Сыктывкарском ЦБК. По содержанию основных компонентов и лимитирующих примесей требованиям, предъявляемым к карбонатному сырью для производства ХОКК, отвечают известняки многих месторождений. Крупными запасами характеризуется Бельгопское месторождение. По результатам технологического опробования и ревизии геологических материалов предлагаются для изучения новые площади, перспективные на выявление месторождений химически чистых известняков. Нами доказана возможность получения ХОКК из известняков сирачойской свиты верхнего девона (Сирачойское, Бельгопское, Седьюское и другие месторождения). Полученный ХОКК удовлетворяет требованиям, предъявляемым к ХОКК, используемому в целлюлозно-бумажной промышленности, характеризуется малым размером частиц (5–10 мкм), веретенообразной формой кристаллов и практически полным отсутствием примесей.

Одним из направлений улучшения качества бумаги является увеличение содержания минерального наполнителя без потери основных потребительских характеристик. Сегодня содержание ХОКК в отдельных видах мелованной бумаги может достигать 40–45 % по массе. В ходе наших исследований были созданы органоминеральные (карбонатно-целлюлозные) композиты (рис. 5) с содержанием минерального вещества 80–90 масс. %. Этим достигаются более низкие влагоемкость и теплопроводность, большая огнестойкость и экологичность продукта. При этом осажденные на волокна целлюлозы кристаллы кальцита хорошо закреплены, равномерно распределены, характеризуются малыми размерами и монодисперсностью. Полученная композиция может быть использована в целлюлозно-бумажной промышленности, строительстве, медицине.

#### Выводы

В Институте геологии Коми НЦ УрО РАН осуществляется минералого-технологическое изучение минерального сырья. Предложены новые методы обо-

гащения угля, ориентированные на повышение качества энергетических углей — снижение зольности, содержания серы, в практическую плоскость выходят проблемы создания и развития углехимических производств. Актуальны вопросы освоения нетрадиционных источников углеводородов. Разработаны и испытаны в лабораторных условиях новые способы обогащения и переработки бокситов, лейкоксеновых руд, цеолитов.

Практическое внедрение полученных результатов будет способствовать инновационно-технологическому развитию минерально-сырьевого комплекса Тимано-Североуральского региона, освоению месторождений особо ценных полезных ископаемых, развитию новых технологий переработки минерального сырья, созданию новых предприятий, решению экологических проблем, связанных с разработкой месторождений полезных ископаемых.

В регионе остается острой потребность в расширении исследований в области технологии минерального сырья и создании регионального центра технологических исследований — геотехнологического стационара. В комплексе с уже имеющимся уникальным исследовательским комплексом по изучению состава и особенностей строения минерального вещества работа данного центра может обеспечить любые потребности формирующегося горнопромышленного комплекса и отраслей, использующих и перерабатывающих минеральное сырье.

#### Благодарности

Исследования проводились на технической базе центров коллективного пользования уникальным оборудованием: (ЦКП) УрО РАН «Геонаука» (ИГ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар), «Хроматография» (ИБ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар), ДВО РАН «Центр исследования минерального сырья» (ИГД ДВО РАН, Владивосток), аналитических сертификационных испытательных центров (АСИЦ) (ВИМС, Москва; ЦНИИгеолнеруд, Казань), лабораторий ОАО «Уралмеханобр» (Екатеринбург), — Института керамики и полимеров, отделом инжиниринга керамики и силикатов Университета Мишкольца (Мишкольц, Венгрия).

Работа выполнена по теме НИР «Научные основы эффективного недропользования, развития и освоения минерально-сырьевой базы, разработка и внедрение инновационных технологий, геолого-экономическое районирование Тимано-Североуральского региона» (ГР № АААА-А17-117121270037-4) при частичной финансовой поддержке Программы УрО РАН «Ресурсно-индустриальная и инфраструктурная трансформация как фактор развития Воркутинской опорной зоны Российской Арктики» (ГР № АААА-А17-117121140075-6, 18-9-5-42).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бурцев, И.Н. Перспективы и возможности глубокой переработки углей Печорского бассейна / И.Н. Бурцев, И.Г. Бурцева, В.А. Салдин, О.С. Процько и др. // Актуальные проблемы, направления и механизмы развития производительных сил Севера — 2014: Ма-

тер. Четвертого Всеросс. науч. семинара. — Сыктывкар: ООО «Коми республиканская типография. — 2014. — Ч. 1. — С. 278–287.

2. Бурцев, И.Н. Бурые угли — перспективный ресурс для создания новых отраслей промышленности в Тимано-Североуральском регионе / И.Н. Бурцев, В.А. Салдин, А.А. Иевлев, Л.А. Анищенко и др. // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. — 2012. — № 10. — С. 26–31.

3. Котова, О.Б. Сорбенты на основе минерального и техногенного сырья для захоронения радиоактивных отходов / О.Б. Котова, И.Л. Шабалин, Д.А. Шушков, А.В. Понарядов // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. — 2015. — № 2. — С. 32–34.

4. Котова, О.Б. Гидротермический синтез нанотрубок диоксида титана из концентрата титановой руды Пижемского месторождения (Россия) / О.Б. Котова, А.В. Понарядов, Л.А. Гёмзе // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. — 2016. — № 1. — С. 34–36.

5. Котова, О.Б. Радиационно-термическое модифицирование железистых бокситов в процессах их переработки / О.Б. Котова, И.Н. Размыслов, В.И. Ростовцев, В.И. Силаев // Обогащение руд. — 2016. — № 4. — С. 16–22.

6. Котова, О.Б. Процесс получения цеолитов из золы уноса / О.Б. Котова, Д.А. Шушков // Обогащение руд. — 2015. — № 5. — С. 60–63.

7. Остащенко, Б.А. Гравитационное обогащение энергетических углей (аналитический обзор, экспериментальные исследования) / Б.А. Остащенко, И.Н. Бурцев, И.Х. Шумилов. — Сыктывкар, 1997.

8. Перовский, И.А. Фтораммонийный способ обескремнивания лейкоксенового концентрата Ярегского месторождения / И.А. Перовский, Г.В. Игнатьев // Прогнозная оценка технологических свойств полезных ископаемых методами прикладной минералогии: Матер. VII Российского семинара. — Петрозаводск: Институт геологии КарНЦ РАН. — 2012. — С. 110–116.

9. Перовский, И.А. Синтез титаносиликатов из лейкоксеновых руд / И.А. Перовский // Вестник Томского государственного университета. — 2014. — № 384. — С. 182–188.

10. Процько, О.С. Петрографический состав и технологические характеристики углей 10-го, 11-го пластов Интинского месторождения (южная часть Печорского бассейна) / О.С. Процько, В.А. Медведева // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. — 2014. — № 10. — С. 8–11.

11. Салдин, В.А. Маркирующие горизонты в верхнеюрских отложениях Ярегского сланцевого района (Северо-Восток Русской плиты) / В.А. Салдин, И.Н. Бурцев, Д.О. Машин, Д.Н. Шебокин, Н.С. Инкина // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. — 2013. — № 11. — С. 25–29.

12. Юшкин, Н.П. Перспективные геотехнологии / Н.П. Юшкин, Б.А. Остащенко, О.Б. Котова, И.Н. Бурцев и др. — СПб: Наука. — 2010.

13. Юшкин, Н.П. Геотехнологии — новые «точки роста» производительных сил Севера / Н.П. Юшкин, И.Н. Бурцев, Б.А. Остащенко. — Сыктывкар, 2006.

14. Kotova, O.B. Physics and chemistry of minerals under laser processing / O.B. Kotova, N. Leonenko // 3-rd International Conference on Competitive Materials and Technology. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 012016. — 2016. doi: 10.1088/1757-899X/123/1/012016.

15. Kotova, O.B. Mineralogy and crystal chemistry of iron in the Timan bauxite and products of their technological processing / O.B. Kotova, V. Silaev, V. Lutoev, A. Vakhrushev // 3-rd International Conference on Competitive Materials and Technology. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 012024. — 2016. doi: 10.1088/1757-899X/123/1/012024.

16. Kotova, O.B. Hydrothermal synthesis of zeolites from coal fly ash / O.B. Kotova, I.N. Shabalin, D.A. Shushkov, L.S. Kocheva // Advances in Applied Ceramics: Structural, Functional and Bioceramics. — 2016. — Vol. 115. — Iss. 3. — P. 152–157.

17. Shushkov, D. Removal of radionuclides by analcime bearing rocks 2013 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering / D. Shushkov, O. Kotova, I. Shuktomova. — P. 198–202.

© Коллектив авторов, 2018

Бурцев Игорь Николаевич // burtsev@geo.komisc.ru  
Котова Ольга Борисовна // kotova@geo.komisc.ru  
Кузьмин Дмитрий Валерьевич // dvkuzmin@geo.komisc.ru  
Машин Денис Олегович // denis.mashin@gmail.com  
Перовский Игорь Андреевич // igor-perovskij@yandex.ru  
Понарядов Алексей Викторович // alex401@rambler.ru  
Размыслов Илья Николаевич // z-project@bk.ru  
Шушков Дмитрий Александрович // dashushkov@geo.komisc.ru