© М.И. Фазлуллин, Г.И. Авдонин, Р.Н. Смирнова, В.И. Ступин, В.И. Разумов, Ю.А. Хижняков, 2008

УДК 622.775

М.И. Фазлуллин, Г.И. Авдонин, Р.Н. Смирнова, В.И. Ступин, В.И. Разумов, Ю.А. Хижняков

О ПЕРСПЕКТИВАХ ПОЛУЧЕНИЯ ГЛИНОЗЕМА МЕТОДОМ СКВАЖИННОГО ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ

Проведен анализ производства алюминия в России. Выделен и охарактеризован метод подземного выщелачивания скважинными системами на месте залегания руд, позволяющий успешно отрабатывать убогие по содержанию руды различных металлов, приуроченные к проницаемым обводненным породам.

Семинар № 17

Промышленное получение глинозема, необходимого для электролиза алюминия, разработано К.Н. Байером в 1887 г. Этот гидрохимический способ, вошедший в техническую литературу под названием «Способ Байера», заключается в выщелачивании природной алюминиевой руды – бокситов – алюминатно-щелочным раствором. До настоящего времени способ Байера, как электролитический способ получения алюминия – основной в производстве глинозема. Наибольшая эффективность применения гидрохимического способа Байера достигается при переработке высокосортных бокситов, характеризующихся относительно высоким содержанием глинозема, низким – кремнезема, при их отношении (кремниевом модуле) не менее 8.

В настоящее время в глиноземной промышленности освоено три вида природного сырья: бокситы, нефелиновые и алунитсодержащие породы и продукты их обогащения. Основной глиноземной рудой являются бокситы, которые обеспечивают около 97 % мирового производства глинозема. В России, кроме бокситов, в промышленных масштабах используются нефелиновые руды.

Ориентировочно об объемах добычи бокситов можно судить по среднему расходу – 5,5 т бокситов на получение 1 т алюминия [1].

Потребление алюминия в мире непрерывно растет. Цены на металл в 2004-2007 гг. держались на высоком уровне. Средняя цена алюминия на Лондонской бирже металлов в 2004г. составила 1 715,5 дол/т, средняя цена за 11 месяцев 2005 г. поднялась до 1 868 дол/т [2]. Цена алюминия на 14.01.08 г. составила 2 483 дол/т. Динамика цен на алюминий в 2005-2007 гг. на Лондонской бирже представлена на рис. 1.

Россия занимает второе место в мире по производству алюминия, при дефиците минерального сырья для его производства. Добываемые в России бокситы обеспечивают 27 % потребностей металлургии в глиноземе. Из нефелиновых руд производится 18 % потребляемого промышленностью глинозема. Остальное сырье, дающее 55 % глинозема, импортируется.

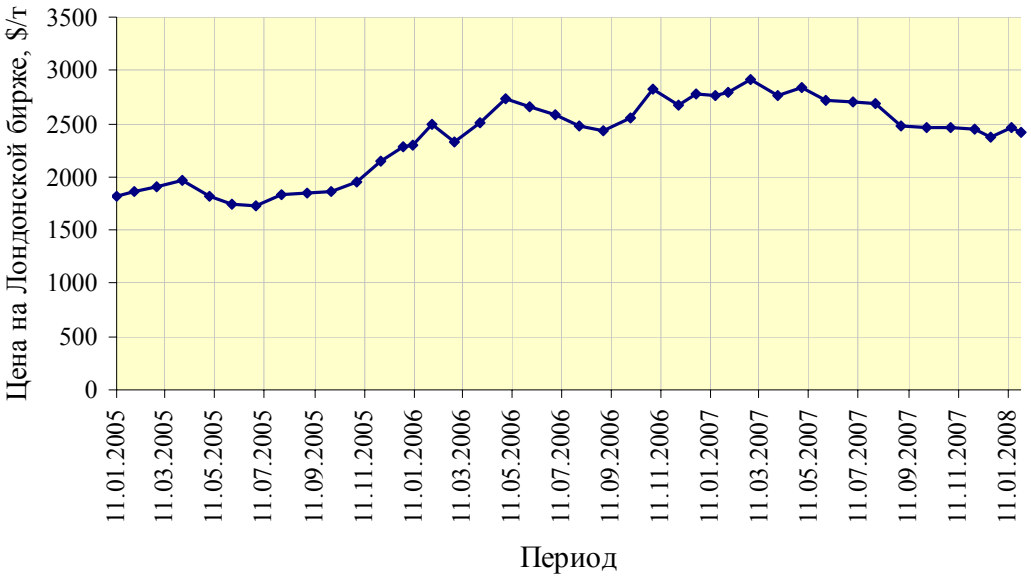

Рис. 1. Динамика изменения цен на алюминий в 2005-2007 гг.

Годовое производство первичного алюминия в России за 30 лет выросло с 2,6 до 3,6 млн т, а добыча бокситов и производство глинозема после сокращения в 1990-е годы вернулись к уровню 70-80 годов.

Российская алюминиевая промышленность занимает одно из главенствующих мест в группе стран с интегрированной алюминиевой промышленностью (в которых организован полный цикл алюминиевого производства от добычи бокситов до производства первичного алюминия). Ее доля в мировом производстве первичного алюминия составляет 12 %, глинозема – 5 %, бокситов – 3 %.

Основными преимущества российской алюминиевой промышленности являются: дешевизна электроэнергии (более 80 % выпускаемого алюминия производится на гидроэлектроэнергии), наличие дешевой рабочей силы и высококвалифицированных кадров, необходимых в высокотехнологичном производстве алюминия, невысокие транспортные тарифы. Затраты российских компаний на производство 1 тонны первичного алюминия составляют: ОАО «Русал» – 1 094 дол., ОАО «СУАЛ» – 1 237 дол., т.е. ниже, чем среднемировые (1240 дол.), что указывает на высокую конкурентоспособность российского алюминия на мировых рынках.

При цене алюминия 1840 дол/т российские компании получают прибыль около 600 дол. с 1 тонны алюминия, что при выпущенных в 2004г. 3,6 млн т алюминия составляет 2,16 млрд дол. Это позволяет российским компаниям осуществлять модернизацию производства, разрабатывать новые технологии и новое оборудование.

Экспорт алюминия нельзя приравнять к экспорту таких сырьевых продуктов как нефть и газ. При экспорте алюминия Россия продает не только природные богатства, а в большей мере – электроэнергию и свои технологии, в сумме обеспечивающие высокую эффективность производства [2].

Несмотря на отмеченные положительные стороны, алюминиевая промышленность России испытывает серьезную сырьевую зависимость от зарубежных поставок глинозема и бокситов, обусловленную недостаточными мощностями отечественного глиноземного производства и низким уровнем освоения подготовленных к эксплуатации месторождений. В целях сохранения достигнутого ежегодного производства металла в ближайшие годы потребуется импортировать около 3 700 тыс. т глинозема.

В то же время Россия располагает низкокачественным алюминиевым сырьем, запасы которого практически не ограничены. Возникает необходимость в разработке промышленных способов отработки низкокачественного алюминиевого сырья. К такому сырью относятся алунитизированные песчаные породы, широко распространенные в обрамлении угольных бассейнов.

Общей особенностью подобных объектов является невысокое содержание подвижного глинозема – 5—8 %, в отдельных случаях до 20 %; приуроченность сульфатов и карбонатов (давсонит) алюминия к проницаемым песчано–гравелитистым пачкам пород; неглубокое залегание (до 100 м) продуктивных горизонтов (в зоне поверхностного и пластового окисления).

Эти факторы не позволяли относить подобные объекты к источникам алюминиевого сырья из-за очень низкого содержания глинозема. Отработка таких руд традиционными способами требовала огромных объемов горных работ и затрат на их отработку. Однако в последнее время широкое распространение получил метод подземного выщелачивания (ПВ) скважинными системами на месте залегания руд. Этот метод позволяет успешно отрабатывать убогие по содержанию руды различных металлов, приуроченные к проницаемым обводненным породам. Широкое распространение метод ПВ получил при добыче урана из «гидрогенных» месторождений, что позволило существенно расширить сырьевую базу уранодобывающей промышленности. На ряде объектов проводятся опытные и опытно-промышленные работы по добыче методом ПВ таких металлов как золото (Гагарское месторождение), медь (Гумешевское месторождение), марганец и т. п.

Подземное выщелачивание основано на растворении полезных компонентов специально подаваемыми в рудный пласт реагентами, последующей откачке на поверхность этих растворов и извлечении из них готовой продукции. По нашему мнению, учитывая хорошую растворимость сульфатов алюминия в щелочных растворах, возможна успешная добыча глинозема (или высококачественного, безжелезистого, сырья для его производства).

На востоке России находится огромная провинция (Окско-Зиминская) с предварительно оцененными запасами в 322 млн т Al_2O_3 при среднем содержании Al_2O_3 6 %. Сульфаты алюминия представлены в основном алюминитом $Al_2[SO_4](OH)_4 \cdot 7H_2O$ и галотрихитом $FeAl_2(SO_4)_4 \cdot 22H_2O$, приурочены к пачкам песчано–гравели-тистых пород. Песчано-галечниковые и валунно-галечниковые отложения характеризуются чередованием валунно-галечникового материала, галечников и рыхлых песчаников, среди которых встречаются алунитизированные части стволов деревьев и конкреции известково-кремнистых песчаников. Промежутки между валунами, гальками и отдельными песчинками заполнены выцветами и корочками галотрихита. Отдельные

гальки облекаются тонкими корочками минерала белого цвета, вероятно алюминия.

Рудовмещающие породы обводнены, пластовые воды безнапорные. Удельные дебиты скважин составляют 0,5-3,0 л/с на 1 м понижения.

Алюминит легко растворяется в растворах едкого натра на холоду. Растворение осуществляется по реакции:

$Al_2[SO_4](OH)_4 \cdot 7H_2O + 4NaOH =$
$= 2NaAlO_2 + Na_2SO_4 + 11H_2O.$

При этом в раствор переходит вся окись алюминия в виде алюмината натрия, а также сульфаты щелочных металлов.

Выщелачивание производится щелочными растворами на месте залегания алюминит–содержащих пород путем подачи их в пласт через нагнетательные скважины. Откачка растворов из пласта производится насосами из системы откачных скважин.

Выщелачивающие растворы готовят путем каустификации сульфатных растворов известью по реакции: $Na_2SO_4 + CaO = NaOH + CaSO_4$, после фильтрации они подаются в нагнетательные скважины.

Известь получается обжигом известняка в известково-газовых печах. Печные газы используются для карбонизации продуктивных растворов.

Поднятые на поверхность продуктивные растворы с содержанием Al_2O_3 20-25 г/л осветляются, обескремниваются и подаются на карбонизацию. Сущность процесса карбонизации состоит в нейтрализации щелочи по реакции

$2\ NaOH + CO_2 = Na_2CO_3 + H_2O.$

В результате уменьшается содержание Na_2O, и происходит разложение алюминатных растворов по реакции

$NaAlO_2 + H_2O \rightarrow Al(OH)_3 + NaOH.$

Помимо гидроокиси алюминия в осадок выпадает алюмокарбонат натрия ($Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 2CO_3 \cdot nH_2O$). Полученный осадок, условно называемый АКН, отфильтровывается, прокаливается и либо передается на глиноземный завод, либо рафинируется до глинозема по способу Байера на месте.

АКН можно использовать как высокосортное сырье для производства глинозема. Его неоспоримым преимуществом перед бокситами является полное отсутствие красных и белых шламов при его переработке.

Помимо этого в Кемеровской области оценено Березовоярское месторождение давсонитовых руд с ресурсами 141 млн т Al_2O_3. Подобные объекты могут быть обнаружены и в других угольных бассейнах.Березовоярское месторождение административно относится к Крапивинскому району Кемеровской области. В районе имеется развитая сеть автомобильных и железных дорог, площадь проявления находится в 60 км от г. Кемерово, в 200 км от алюминиевого завода в г. Новокузнецке и в 300 км к юго-западу от Ачинского глиноземного комбината.

В давсонитовых рудах месторождения, кроме глинозема, содержится гамма попутных элементов (Sc, Y, Li, Nb, Ga, V), количество которых в продуктивных растворах может оказаться интересным.

В случае потери в недрах при отработке методом ПВ 50 % глинозема, оставшиеся ресурсы могли бы обеспечить работу предприятия мощностью 1 млн т глинозема и 1,5 млн т соды в течение 50-70 лет.

Давсонитовые руды Березовоярского месторождения изучались во ВНИИгеолнеруде в 1989-1991 годах с целью их отработки методом подземного выщелачивания. Проведенные исследования показали обводненность продуктивных

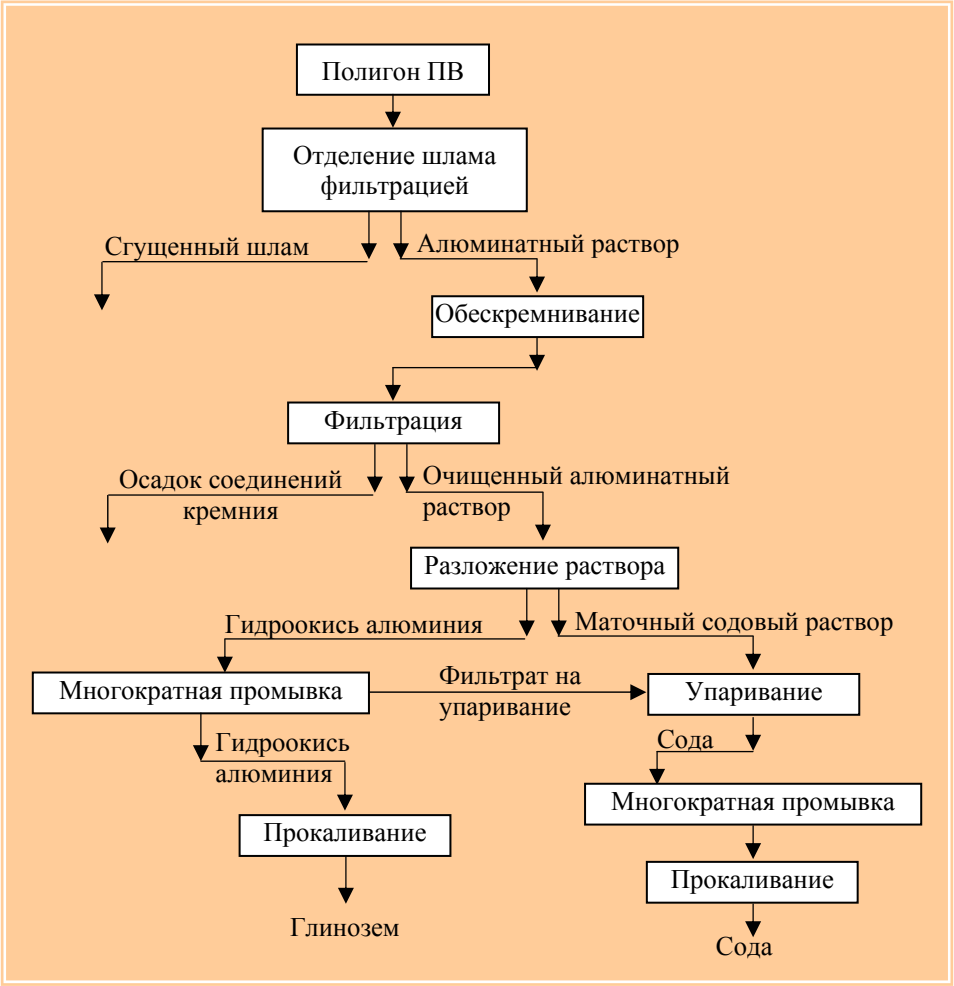

Рис. 2. Технологическая схема получения глинозема и соды при разработке месторождения давсонита методом ПВ

горизонтов месторождения, возможность перевода глинозема в продуктивные растворы и его извлечения в процессе их переработки.

Выщелачивание давсонита осуществляется по следующей реакции:

$NaAl(OH)_2CO_3 + NaOH =$
$=NaAlO_2 + Na_2CO_3 + 2H_2O.$

Теоретически при расходе NaOH 0,56 т из 1 т давсонита получается 0,71 т $NaAlO_2$+0,74 т Na_2CO_3+ +0,25 т H_2O.

Реакция идет только при избытке NaOH (каустический модуль $Na_2O/Al_2O_3 = 1,86$).

Коэффициент извлечения давсо-нита в зависимости от его содержания и скорости подачи растворителя принимается равным 80 %.

При подземном выщелачивании давсонитсодержащих пород предусматриваются следующие технологические операции:

- выщелачивание полезных компонентов при температуре окружающей

Удельные расходы основных материалов и реагентов для выщелачивания сульфатных руд

Наименование	Ед. измерения	Удельный расход	Цена за ед.	Удельные затраты
Известняк	т/т	2,1	650 руб./т	1365
Оборотная вода	$м^3$/т	25	0,01 руб./$м^3$	0,25
Техническая вода	$м^3$/т	0,98	0,15 руб./$м^3$	0,15
Топливо натуральное	кг/т	245	900 руб./т	220,5
Электроэнергия	кВт-ч/т	270	1,83 руб./кВт-ч	494,1
Сооружение скважин	пог. м/т	0,08	2800	224
ИТОГО:				**2 304,00** руб/т

Примечание: расчет расхода электроэнергии, воды и топлива произведен по материалам производства извести с учетом данных по переработке продуктивных растворов на предприятиях ПВ.
Расход известняка произведен по стехиометрическим расчетам.

среды, подъем продуктивного раствора на поверхность;

- обескремнивание полученных продуктивных растворов;
- разложение продуктивного раствора с получением гидроокиси алюминия и маточного содового раствора;
- выделение гидроокиси алюминия фильтрацией;
- упаривание содовых маточных растворов и выделение соды;
- прокаливание полученных продуктов.

Технологическая схема получения глинозема и соды при разработке месторождения давсонита методом ПВ приведена на рис. 2 [3].

На наш взгляд, есть основание продолжить научно-исследовательс-кие, опытные и опытно-промышлен-ные работы на Березовоярском месторождении давсонита с целью разработки экономически и экологически приемлемой технологии получения глинозема и соды методом подземного выщелачивания, учитывая близость объекта к российским алюминиевым заводам.

Себестоимость добычи «продук-ции» при ПВ складывается из:

- затрат на вскрытие запасов полезных ископаемых (оборудование, бурение технологических скважин, их обсадку и обвязку в добычные полигоны);
- затрат на «подъем» и перекачку растворов;
- затрат на реагенты.

Затраты на вскрытие руд определяются количеством погонных метров бурения на тонну балансовых запасов. При рядной системе отработки на одну откачную скважину приходится в среднем 2,2 закачные. Общее количество скважин составляет 3,2 на одну ячейку при глубине скважин ~70 м объем бурения составит 224 пог./м на ячейку. При сети скважин 20×20×40 (расстояние между откачными скважинами в ряду 20 м, между закачными 20 м, между рядами 40 м) площадь добычной ячейки составит 1 600 $м^2$. Средняя рудная мощность при содержании Al_2O_3 6 % составляет 20 м. Таким образом, на одну ячейку приходится

$$Q = 60 \text{ кг/т} \times 1{,}6 \text{ т/м}^3 \times 1\,600 \text{ м}^2 \times$$

$$\times 20 \text{ м} = 3\,072 \text{ т}$$

до 3 072 т «подвижного» Al_2O_3, и удельные буровые затраты составят 0,08 пог. м/т. Удельные затраты на реагенты и бурение составят 2 304,0 руб/т (см. таблицу).

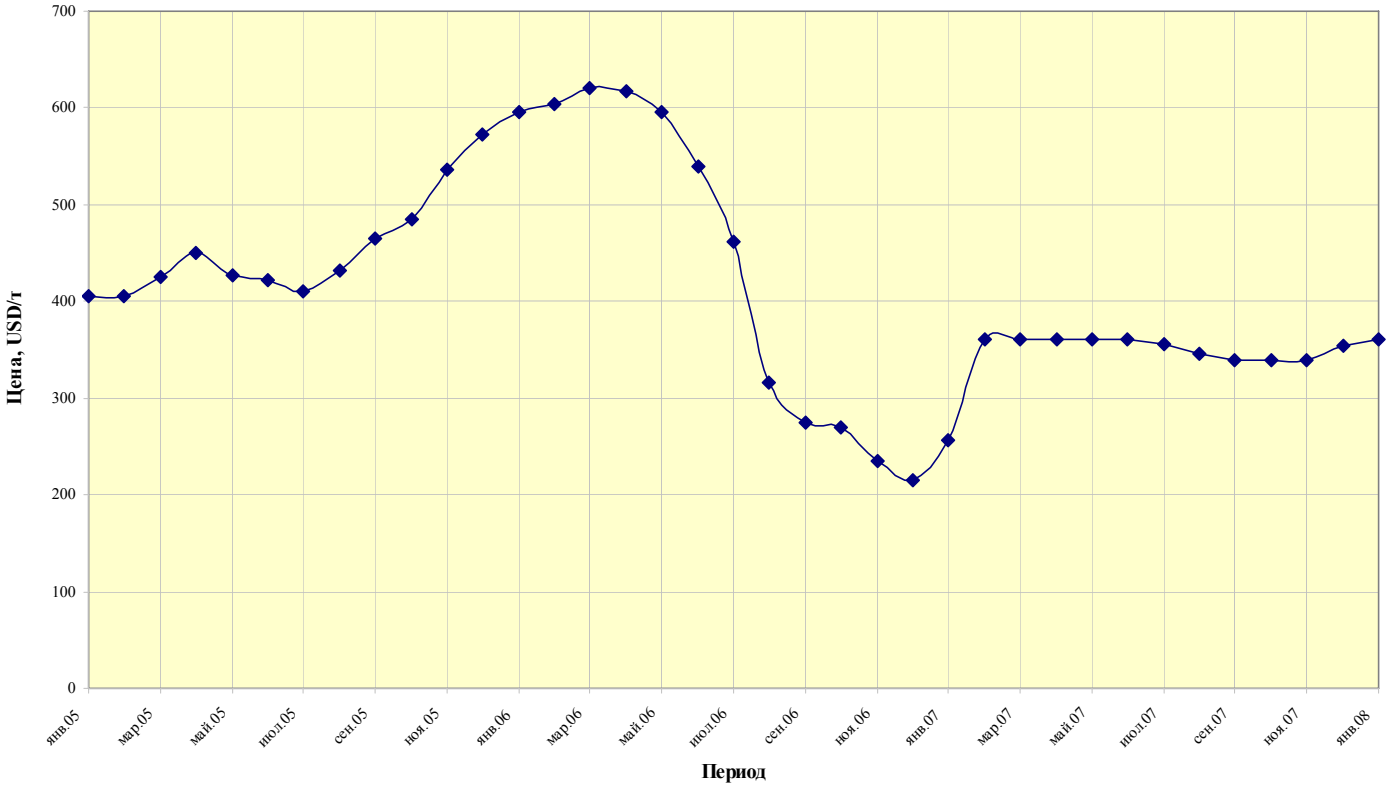

Рис. 3. Динамика изменения цен на глинозем металлургический (Европейский рынок)

Для обслуживания полигона и перерабатывающей установки (по опыту работы цехов ПВ) производительностью 1200-1300 м^3/час 150-170 отк. скв.) необходимо 300 человек списочного состава или 3600 чел/мес. в год. При средней зарплате 28 000 руб/мес. ФОТ с налогами составит 138 млн руб. При плановой производительности цеха 200 000 т глинозема в год удельные затраты на оплату труда составят 690 руб/т.

С учетом плановых накоплений и НДС минимальные удельные затраты на производство 1 т АКН составят 3 892 руб/т или 160 дол/т (при дол. = 24,5 руб.).

Затраты на рафинирование АКН по методу Байера составят 100-120 дол/т. Таким образом цех с производительностью по продуктивным растворам 1 200-1 400 м^3/час может производить до 200 000 т глинозема в год с себестоимостью 260-280 дол/т.

Цена металлургического глинозема по состоянию на январь 2008 г. составляет 360 дол/т (рис. 3) [4].

Ожидаемая прибыль составит 80-100 дол/т глинозема.

Для претворения в жизнь рассмотренных технологий в первую очередь необходимо изучить геолого-гидрогеологические условия применимости метода скважинного подземного выщелачивания в конкретной обстановке месторождений.

Методика проведения исследований детально рассмотрена в работе [5].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Одокий Б.Н., Остроумова Т.С., Меньшин А.Ю. «Минерально-сырьевая база алюминиевой промышленности мира». Минеральное сырье, серия геолого-экономическая, № 11, – М.: изд. ВИМС, 2001, 106 с.

2. *Ремизова Л.И.* Россия в структуре мировой алюминиевой промышленности. Минеральные ресурсы России. Экономика и управление, 2006 г. № 1.

3. *Старосуд А.Н. и др.* Отчет по теме «Разработать и внедрить рекомендации по геотехнологической оценке давсонитсодержащих пород Кузбасса», ВНИИгеолнеруд, г. Казань, 1991 г.

4. *Цена* алюминия в 2005-2007гг. Интернет-издание mineral.ru/chapters.

5. *Справочник* по геотехнологии урана. Под редакцией Д.И. Скороварова, М., Энергоатомиздат, 1997, с.127-158. ГИАБ

Коротко об авторах

Фазлуллин М.И., Авдонин Г.И., Смирнова Р.Н. – ФГУП «ВНИИХТ»,
Ступин В.И. – ООО НПП «ГЕОТЭП»,
Разумов В.И., Хижняков Ю.А. – ЗАО «УДК Горное».

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 17 симпозиума «Неделя горняка-2008». Рецензент д-р техн. наук, проф. *В.Ж. Аренс.*