

МИНЕРАЛЫ ГРУППЫ СИЛЛИМАНИТА КАК НОВОЕ ПЕРСПЕКТИВНОЕ СЫРЬЕ
ДЛЯ АЛЮМИНИЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ РОССИИ

Г.Г. Лепезин, С.А. Каргополов, В.Ю. Жиравковский

*Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия*

Проанализировано состояние сырьевой базы алюминиевой промышленности России, включающей традиционные (бокситы, нефелиновые сиениты) и нетрадиционные (сынныриты, анортозиты, золы ТЭЦ, каолины) типы руд. По совокупности многих критериев (запасы, качество руд, технологии переработки и др.) проблема дефицита глинозема в перспективе решается с вовлечением в разработку минералов группы силлиманита-МГС (андалузит, силлиманит, кианит). Они имеют общую формулу Al_2SiO_5 (в мас. %: $Al_2O_3 = 62.9$; $SiO_2 = 37.1$). Их разведанные запасы в пересчете на конечный продукт — алюминий — превышают 400 млн т. Если его производить в тех объемах, в которых он производится в настоящее время (в 2008 г. получено более 4 млн т), то разведанных запасов хватит более чем на 100 лет. Практически все месторождения можно разрабатывать открытым способом, при обогащении применяются гравитация, флотация, электромагнитная сепарация. Содержание глинозема в концентратах достигает 60—62 мас. %. За исключением высококачественных бокситов никакие другие виды сырья и способы их обогащения не могут дать таких концентраций Al_2O_3 . МГС можно перерабатывать совместно с нефелиновыми рудами по технологии спекания или напрямую получать из них силумин и алюминий с применением электротермии, минуя стадию производства глинозема. Именно этот вариант и является наиболее перспективным для нашей страны.

Бокситы, нефелиновые руды, сынныриты, анортозиты, золы, каолины, минералы группы силлиманита, электротермия, глинозем, силумин, алюминий.

SILLIMANITE GROUP MINERALS: A NEW PROMISING RAW MATERIAL
FOR THE RUSSIAN ALUMINUM-PRODUCING INDUSTRY

G.G. Lepezin, S.A. Kargopolov, and V.Yu. Zhirakovskii

The raw-material base of the Russian aluminum-producing industry is considered. The raw materials include common (boxites, nepheline syenites) and uncommon (synnyrites, anorthosites, power-and-heating plant ashes, kaolines) types of ores. With regard to many criteria (reserves and quality of ores, technology of their processing, etc.), the problem of alumina deficit can be solved by mining sillimanite group minerals Al_2SiO_5 (wt. %: $Al_2O_3 = 62.9$, $SiO_2 = 37.1$), namely, andalusite, sillimanite, and disthene. Their explored reserves converted to the final product (aluminum) exceed 400 mln tons. This will be enough for more than a hundred years on condition that aluminum will be produced in the present-day output (>4 mln tons in 2008). Almost all deposits can be explored by strip mining, with application of the gravity, flotation, and electromagnetic separation methods for aluminum concentration. The alumina content in concentrates reaches 60–62 wt. %. Only high-quality boxites and the above concentration methods can ensure such a high yield of Al_2O_3 . Sillimanite group minerals can be processed together with nepheline ores by sintering or be used for the direct electrothermal production of silumin and aluminum, excluding the alumina production stage. The latter method is the most promising in Russia.

Boxites, nepheline ores, synnyrites, anorthosites, ashes, kaolines, sillimanite group minerals, electrothermics, alumina, silumin, aluminum

ВВЕДЕНИЕ

По объемам потребления алюминий среди цветных металлов занимает первое место. Легкость, пластичность, высокая тепло- и электропроводность, устойчивость к коррозии и другие свойства обуславливают широкое его применение в авиационной и автомобильной промышленности, электротехни-

Таблица 1.

Динамика производства алюминия в России и мире

Завод	Год ввода в действие	Производство по годам (тыс. т)							
		2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
ВАЗ	1932	21.5	22.0	23.0	23.0	22.9	23.4	24	24
УАЗ	1939	85.0	92.0	103.3	125.2	128.7	132.6	128	133.6
БАЗ	1943	175.0	178.0	180.0	183.1	182.7	183.6	189	185.6
НКАЗ	1943	282.0	288.0	295.9	305.0	310.8	323.2	350	318
КАЗ	1951	70.0	76.0	78.0	71.7	72.2	74.3	80	75.7
НАЗ	1954	72.3	74.0	76.0	76.7	78.0	80.2	84	81.5
ВОЛАЗ	1959	145.2	150.0	151.0	156.3	155.4	158.4	168	170
ИРКАЗ	1962	272.0	275.0	278.0	287.8	293.5	294.7	294	358
БРАЗ	1966	919.1	918.3	932.5	960.0	973.6	983.7	1045	1000
КРАЗ	1966	852.5	867.0	903.5	921.4	925.3	948.0	989	1000
САЗ	1986	406.8	409.0	459.0	483.6	504.0	531.0	555	537
ХАЗ	2007	—	—	—	—	—	—	160	300*
Итого	—	3301.4	3349.3	3480.2	3593.8	3647.1	3733.1	4066	4200
Мировое пр-во	—	23922	25520	27962	29281	31269	33218	37410	38759

* Проектная мощность.

ческого машиностроения, в строительстве, при изготовлении потребительских товаров, тары, упаковки и другой продукции.

По данным Геологической службы США (U.S. Geological Survey), мировое производство алюминия в 2008 г. составило 39.7 млн т (в Китае — 13.1, в России — 4.2 млн т). Ведущими производителями крылатого металла являются Rio Tinto Alcan (Австралия—Англия), Alcoa, Reynolds, Kaiser Aluminum & Chemical Corp. (США), Camalco (Австралия), Norsk Hydro (Норвегия), Pechiney (Франция), Alusuisse (Швейцария), ОК РУСАЛ (Россия).

В нашей стране функционируют двенадцать алюминиевых заводов, из них шесть находятся в Сибири (Братский — БРАЗ, Иркутский — ИРКАЗ, Красноярский — КРАЗ, Саянский — САЗ, Хакасский — ХАЗ, Новокузнецкий — НКАЗ), два на Урале (Богословский — БАЗ, Уральский — УАЗ), четыре на западе и северо-западе страны (Кандалакшский — КАЗ, Волховский — ВАЗ, Надвоицкий — НАЗ, Волгоградский — ВОЛАЗ). В 2008 г. они произвели более 4 млн т алюминия (табл. 1). Достаивается завод в Иркутской области — «Алюком-Тайшет» (750 тыс. т), принято решение построить Богучанский алюминиевый завод в Нижнем Приангарье на 600 тыс. т. Таким образом, налицо тенденция наращивания мощностей по производству первичного алюминия в стране.

При этом дефицит глинозема из отечественного сырья для алюминиевых заводов превышает 50 % и в перспективе будет только возрастать. Подчеркнем, что в настоящей работе мы рассматриваем возможности решения проблемы дефицита глинозема в России в стратегическом плане, не рассматривая кризисные явления текущего периода.

Специалисты-эксперты считают, что алюминиевая промышленность России может быть конкурентоспособной только в том случае, если в совокупных затратах энергетическая составляющая не будет превышать 15—17 %, транспортная — 6—8 % [Кальченко, 2001; и др.]. Действительная же ситуация здесь такова: затраты на электроэнергию достигли 20—30 %, на транспортные перевозки — 17—18 % (для сравнения: в Канаде 2—3 %). Как могут конкурировать, например, сибирские алюминиевые заводы с зарубежными, не имея своего сырья, покупая глинозем в Австралии и перевозя его морским, а далее железнодорожным транспортом на расстояние в 4—4.5 тыс. км? Глинозем нашим заводам обходится на 30—40 % дороже, чем американским производителям.

С целью повышения рентабельности производства алюминия и снижения его себестоимости даются рекомендации [Алюминиевая промышленность..., 1997; Пурденко, 1997; Сизяков, 1999; Броневова, Ланкин, 2001; Прокопов, 2002; и др.]: 1) создавать вертикально и горизонтально интегрированные структуры от добычи сырья до изготовления изделий из алюминия; 2) заключать долгосрочные соглашения с поставщиками глинозема; 3) внедрять энерго- и ресурсосберегающие технологии; 4) строить в рамках крупных компаний собственные энергопроизводящие предприятия. Рекомендации, безусловно, полезные, однако носят общий характер, и их реализация в лучшем случае приблизит организацию и технологию производства на российских заводах к организации и технологии производства на заводах передовых зарубежных стран. В перспективе можно увеличить и внутреннее потребление алюминия, но где

брать сырье и что делать с высокими затратами на его транспортировку? Глинозем поставляется из стран ближнего (Украина, Казахстан) и дальнего (Австралия, Бразилия, Гвинея и другие страны) зарубежья. Изношенность основных фондов, относительно низкий технологический уровень производства, дефицит глинозема, малое потребление производимой продукции на внутреннем рынке, высокие энергетические и транспортные затраты — вот тот далеко не полный перечень проблем, которые требуют оперативного решения. Ситуация еще в большей степени осложнится, если отменить толлинг и запретить оффшоры. После вступления России в ВТО и принятия условий либерализации энергетического рынка исчезнет дешевая электроэнергия, а поэтому кроме дешевой рабочей силы никаких других преимуществ у российских производителей крылатого металла перед зарубежными конкурентами не будет.

ПРОИЗВОДСТВО ГЛИНОЗЕМА

По данным Международного института алюминия («IAI»), мировое производство глинозема в 2007 г. составило 78.346 млн т. В России его производят Богословский и Уральский алюминиевые заводы, Пикалевское объединение «Глинозем», Бокситогорский и Ачинский глиноземные комбинаты (табл. 2).

На одну тонну производимого алюминия требуется более двух тонн глинозема (расчетная потребность 1.92 т). Производство алюминия в нашей стране растет, производство глинозема не меняется. В настоящее время его дефицит превышает 5 млн т. Если проекты со строительством новых алюминиевых заводов будут реализованы, то он возрастет до 9—15 млн т.

Практически весь товарный глинозем в мире производится из бокситов. Открытый в 1899 г. К. И. Байером гидрохимический способ их переработки является основным в мировой глиноземной промышленности. Он эффективен и прост, но применим только к высококачественным бокситам. Находит применение и способ спекания, который используется при переработке бокситов низкого качества, а также нефелинов, алунитов, каолинов и других видов низкосортного глиноземного сырья. Способ Байера дешевый и распространенный, способ спекания более дорогой, но наиболее универсальный. Зарубежная глиноземная промышленность работает на высококачественных бокситах. Мировые ресурсы бокситов как основного сырья для получения глинозема оцениваются Геологической службой США в 55—75 млрд т, на долю России приходится около 1 %.

Теоретически глинозем и алюминий можно извлекать из многих природных и техногенных продуктов. Вопрос состоит лишь в том, каковы их ресурсы, насколько они доступны, каковы затраты на освоение (себестоимость, рентабельность, окупаемость), известна ли технология добычи, обогащения и извлечения, а также, каковы будут экологические последствия от создания соответствующих производств. Именно с этих позиций мы далее и будем рассматривать бокситы, нефелиновые руды, сынныриты, анортозиты, каолины, промышленные золы, минералы группы силлиманита (МГС). Эти виды сырья либо уже используются в производстве глинозема (бокситы, нефелиновые руды), либо считаются перспективными сырьевыми источниками (все остальное).

Бокситы для нашей страны являются традиционным типом сырья. Основные их ресурсы (91 %) сконцентрированы в европейской части России. В разрабатываемых месторождениях Северо-Уральского, Северо-Онежского, Среднетиманского и неразрабатываемом Висловском бокситоносных районах содержится около 70 % разведанных запасов. Добыча бокситов характеризуется ежегодным приростом в несколько процентов, в то время как разведанные запасы сокращаются (рис. 1).

Бокситы Северо-Уральского бокситорудного района (месторождения Кальинское и Красная Шапочка) первого сорта (мас.%): $Al_2O_3 = 53.4$; $SiO_2 = 4.8$. Извлекаются они подземным способом с глубины 900—1000 м. Себестоимость добычи высокая, и ставится вопрос о закрытии рудников.

Таблица 2. Динамика производства глинозема в России

Завод или комбинат	Производство по годам (тыс. т)								
	Год ввода	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Бокситогорский ГК (г. Бокситогорск)	1938	165	121	131	132	133	138.3	143.0	156.4
Уральский АЗ (г. Каменск-Уральский)	1939	651	675	714.5	721.3	725.7	725.8	760.0	730.3
Богословский АЗ (г. Краснотурьинск)	1944	1049	1075	1100	1095.2	1098	1078	1100	1084
Пикалевский глиноземный завод (г. Пикалево)	1959	220	239	274	251	195.1	197.5	205.0	?
Ачинский ГК (г. Ачинск)	1970	965	1035	1050	1040	1060	1038	1 082	1069.4
Всего		3050	3145	3245.6	3268	3229.2	3232	3339.0	3040

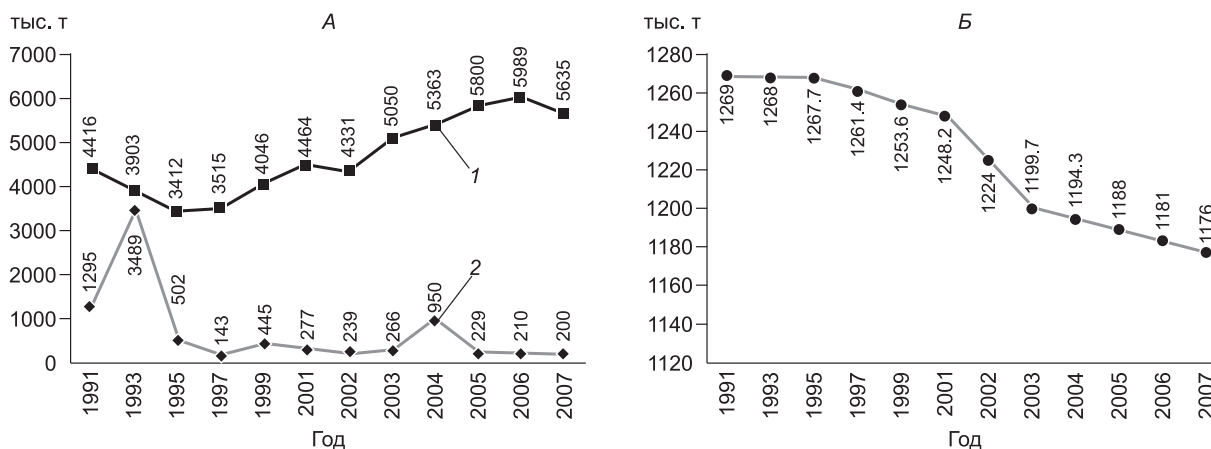


Рис. 1. Динамика добычи бокситов и прироста их запасов в 1991—2007 гг. (А) и сокращение разведанных запасов бокситов А+В+С (Б).

Построен по данным [О состоянии..., 2006], с дополнениями авторов.

1 — добыча бокситов, 2 — прирост запасов А+В+С₁.

Бокситы Северо-Онежского бокситорудного района низкого качества (мас.%): $Al_2O_3 = 53.4$; $SiO_2 = 17.3$.

Белгородский бокситорудный район (Иксинское месторождение) характеризуется крупными запасами бокситов высокого качества (мас.%: $Al_2O_3 = 49.5$; $SiO_2 = 8.3$), но они находятся на глубине 500 м. Это делает их добычу нерентабельной.

Основные надежды на рост производства бокситов возлагаются на Среднетиманский бокситоносный район, где разведанные запасы руд составляют 250 млн т. Качество бокситов среднее (мас.%): $Al_2O_3 = 50.3$; $SiO_2 = 7.7$. Проектная мощность ОАО «Боксит Тимана» рассчитывалась на производство 2.5 млн т руды (в 2006 г. добыто 2.39 млн т), за 7 месяцев 2008 г. произведено 1.175 млн т.

Есть бокситы и в Сибири (Чадобецкое, Барзасское, Татарское, Боксонское и другие месторождения), но они имеют сложный минералогический состав, содержат много оксида железа (30—40 мас.%), титана (до 10 %) и соединений фосфора (0.3—1.3 %). Количество глинозема в них 36—40 %, кремниевый модуль 3.7—6.2. К числу пригодных для промышленной эксплуатации относятся бокситы Чадобецкого месторождения, но на их основе в лучшем случае можно построить глиноземный завод средней мощности.

Традиционным видом глиноземного сырья для России являются и нефелиновые руды. В настоящее время эксплуатируются Хибинские месторождения (нефелиновые концентраты с 29 % Al_2O_3 и ~19 % щелочей) и Кия-Шалтырское месторождение уртитов (25—26 % Al_2O_3 , ~10 % щелочей). Перспективными считаются Мухальское ($Al_2O_3 = 27—28$ %, $K_2O + Na_2O = 10—15$ %) и Баянкольское ($Al_2O_3 = 27—24$ %) месторождения.

Нефелиновые руды перерабатываются на трех предприятиях. Волховский и Пикалевский заводы работают на нефелиновых концентратах ОАО «Апатит», Ачинский комбинат (АГК) — на уртитовых Кия-Шалтырского месторождения. Технология извлечения глинозема спекательная. Это комплексный тип сырья. Помимо глинозема из него получают соду, поташ, цемент.

В 2009 г. Пикалевский завод из-за ценового конфликта с ОАО «Апатит» переведен на производство цемента. Не все благополучно и на АГК. В связи с разубоживанием руд на Кия-Шалтырском месторождении растут удельные объемы добываемой породы и отходы производства — шламы, а соответственно растет и себестоимость получаемого глинозема. Начиная с 2000—2002 гг. рост добычи руд происходит опережающими темпами (рис. 2), что связано с ухудшением их качества.

Кроме Кия-Шалтырского месторождения, в Кемеровской области и Красноярском крае известно около 100 других месторождений и рудопроявлений нефелиновых руд (Горячегорское, Белогорское, Медведка, Андриюшкина речка, Ужурское, Татарское и др.). Из них два первых рассматриваются в качестве резервной базы АГК. Порядка 20 массивов находятся в Восточном Забайкалье. Содержание глинозема в рудах колеблется от 22 до 27 % ($K_2O + Na_2O = 12—20$ %), наиболее богатыми являются уртиты Баянкольского месторождения ($Al_2O_3 = 26.5$ %). Оно находится в пределах нагорья Сангилен (Республика Тыва). Балансовые запасы руд по категориям А+В+С оцениваются в 350 млн т.

Рис. 2. Соотношения объемов добываемой руды и производства глинозема на Ачинском глиноземном комбинате (по данным ОК РУСАЛ).



Помимо бокситов и нефелиновых руд перспективными сырьевыми источниками для производства глинозема и алюминия считаются также сынныриты, анортозиты, каолины, золы и минералы группы силлиманита.

Наиболее крупные скопления сынныритов сконцентрированы в Сибири на Сыннырском, Южно-Сакунском и Маломурунском массивах. Количество Al_2O_3 в них низкое (20—22 % мас.%), а поэтому создать масштабное его производство на базе этого вида сырья невозможно. Они представляют интерес прежде всего с точки зрения получения на их основе бесхлорных калийных удобрений. Сынныриты содержат до 19—20 % K_2O . Именно с этих позиций к ним и следует подходить. А глинозем, если и будет извлекаться, то только в качестве попутного продукта.

В качестве сырья для производства Al_2O_3 и алюминия часто рассматриваются и анортозиты, которые в России пользуются широким распространением (ресурсы составляют десятки—сотни миллиардов тонн): Кольская, Анабарская, Алданская, Охотская провинции. Один из крупнейших анортозитовых поясов протягивается от Восточного Забайкалья до побережья Охотского моря.

Существует много запатентованных технологий получения из них глинозема и алюминия, большая часть которых базируется на кислотном выщелачивании (H_2SO_4 , HNO_3 , HCl). Имеется опыт промышленной их переработки. В 70-е годы прошлого столетия компания «Toth Company» получала алюминий с использованием карботермальной хлорной технологии. Известен пример создания полупромышленного производства алюминия до 15000 т в год компанией «Alcoa» на основе технологии хлоридного электролиза. В Норвегии, обладающей крупными ресурсами анортозитов, технологические исследования реализовывались на уровне национальных программ (например проект «Anortal»). К сожалению, все они оказались неконкурентоспособными. Основными причинами неэффективности производств являются коррозия оборудования и большой выход попутных продуктов.

Разработками технологий переработки анортозитов с целью извлечения алюминия, минуя стадию получения глинозема, занимаются и в Амурском научном центре ДВО РАН. Исследования проведены пока что в лабораторных условиях.

С точки зрения сегодняшнего дня анортозиты следует рассматривать как полевошпатовое сырье, которое можно использовать при производстве керамики бытового и технического назначения, строительных материалов, абразивов, наполнителей пластмасс и резин, специальных красок и другой продукции.

Глинозем можно извлекать и из зол ТЭЦ. Содержание Al_2O_3 в них иногда достигает 30—40 %. Проблема утилизации золоотвалов является актуальной с разных точек зрения. Разработаны серно-кислотная, азотно-кислотная и соляно-кислотная технологии их переработки с получением сульфата алюминия, глинозема, вяжущих и строительных материалов, нитратных удобрений, цемента, чугуна, титана.

Несмотря на то, что технологии переработки отходов углеперерабатывающей промышленности известны и апробированы, их практическое применение трудно реализуемо, прежде всего, из-за сложностей работы с кислотами, так как требуется дорогостоящее оборудование из кислотостойких материалов. Затратным является и приобретение самих кислот. Кроме того, состав зол может сильно меняться в зависимости от состава угля и способа его сжигания. Поэтому масштабное производство глинозема и алюминия из зол на настоящий момент нереально.

Потенциальным видом сырья для производства глинозема и алюминия считаются и каолины. Технология получения из них силумина известна — это электротермия. Месторождения находятся в Челябинской, Свердловской, Оренбургской, Томской, Амурской областях и в Красноярском крае. В связи с низким их качеством ($Al_2O_3 = 21—22$ %, в концентратах до 34 %) и относительно небольшими запасами создание крупномасштабного производства глинозема, силумина и алюминия на базе данного вида сырья перспектив не имеет. В настоящее время каолины используются при изготовлении огнеупоров, керамики, фарфора, фаянса, пластмасс, наполнителей резины, разных сортов бумаги, красок и другой продукции.

Минералы группы силлиманита (МГС — андалузит, силлиманит, кианит) имеют общую формулу Al_2SiO_5 . Теоретически их состав (мас. %): $Al_2O_3 = 62.9$; $SiO_2 = 37.1$.

Разведанные запасы МГС западных стран составляют 450 млн т. Месторождения разрабатываются открытым способом при их содержании в рудах более 10 %. Методы обогащения: гравитация, флота-

ция, магнитная и электрическая сепарация. Мощности перерабатывающих предприятий: 5—50 тыс. т концентратов в год.

Добычу руд и производство концентратов осуществляют ЮАР, США, Индия, Франция, Бразилия, Швеция. ЮАР и Франция получают андалузит, США, Индия и Украина — кианит, силлиманит, Бразилия, Швеция, Испания — кианит. В сумме они производят 700—750 тыс. т продукции в год. Цены на минералы группы силлиманита за последние 50 лет возросли с 20 до 160—260 долларов за одну тонну.

В Сибирском отделении Российской академии наук ведутся многолетние исследования МГС [Лепезин и др., 1979, 1989, 1996, 1997, 2003; А.с., 1980; Семин и др., 1982, 1983; Лепезин, Горюнов, 1988; Лепезин, Семин, 1989; Лепезин, 1997а,б, 2003, 2004, 2005]. Охарактеризованы области их применения, описаны конкретные месторождения, приведены химические и минералогические составы руд, разработаны технологии обогащения, получены концентраты первого и высшего сортов, определены огнеупорные характеристики приготовленных из них изделий, даны конкретные рекомендации и т.д.

В России крупные месторождения и рудопроявления МГС сосредоточены на Кольском полуострове (Кейвская группа), в Карелии (Хизовара), на Урале (Абрамовское, Карабашское, Борисовское, Михайловское и др.), в Сибири (Читинская область — Тымбинское; Республика Бурятия — Кяхтинское; Иркутская область — Китойское; рудопроявления Витимо-Патомского нагорья; Красноярский край — Базыбайское, Заангарье Енисейского кряжа; Республика Тыва — Тарлашкинхемское, Мугурское, Моренское, Улорское; Горный и Рудный Алтай — Курайское, Чаустинское, Бугузунское, Нижнеберезовское). Практически все месторождения можно разрабатывать открытым способом. Технология обогащения включает гравитацию, флотацию, электромагнитную и электрическую сепарацию. Наиболее эффективными являются комбинированные методы.

В настоящее время минералы группы силлиманита широко применяются при производстве огнеупоров, керамики, фарфора и другой высокотехнологичной продукции (Лепезин, Горюнов, 1988). Они могут также перерабатываться на глинозем методом спекания как отдельно [Лайнер, Екимов, 1972], так и в смеси с нефелиновыми рудами [А.с., 1980; Семин и др., 1982]. Известен и электротермический способ получения из них силумина и алюминия.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Проблема дефицита глинозема в России есть, и она при существующих объемах производства алюминия не может быть решена за счет отечественных бокситов, нефелиновых руд и тем более за счет сынныритов, анортозитов, зол и каолинов из-за низкого их качества, относительно малых запасов и отсутствия эффективных и экологически безопасных технологий переработки. Бесперспективным является и вариант работы алюминиевых заводов на импортном глиноземе. Затраты на его приобретение и транспортировку если и могут быть компенсированы, то только частично за счет дешевой рабочей силы и пока что дешевой электроэнергии. Наиболее перспективным сырьем для производства глинозема и алюминия применительно к нашей стране являются минералы группы силлиманита [Лепезин, 2003, 2004, 2005]. Перед всеми остальными видами глиноземного сырья они имеют явные преимущества. Состав руд, как правило, простой (месторождения Хизовара в Карелии, Абрамовское, Карабашское, Борисовское на Урале, Кяхтинское в Сибири и др.), на их базе можно создать безотходное производство концентратов с получением в качестве товарных продуктов МГС, кварца, рутила, слюд. Количество глинозема в концентратах минералов группы силлиманита достигает 60—62 мас.% (табл. 3, 4). За исключе-

Таблица 3. Химические анализы концентратов минералов группы силлиманита из российских месторождений (мас.%)

Компонент	Теоретический состав МГС — Al_2SiO_5	Среднестатистический состав МГС ($n = 186$)	Выборочные химические анализы концентратов МГС					
SiO_2	37.1	37.01	40.06	39.01	37.47	36.78	37.21	37.57
TiO_2	—	—	0.55	0.25	0.67	0.35	0.23	0.66
Al_2O_3	62.9	62.72	57.07	59.47	60.45	62.64	60.20	60.40
FeO	—	0.29	0.61	0.10	0.37	0.00	0.26	0.49
MnO	—	0.01	0.10	0.00	0.10	0.10	0.10	0.10
MgO	—	0.03	0.01	0.03	0.00	0.00	0.09	0.05
CaO	—	0.01	0.06	0.03	0.03	0.03	0.54	0.06
Na_2O	—	0.00	0.40	0.22	0.09	0.00	0.00	0.00
K_2O	—	0.00	0.06	0.10	0.05	0.06	0.53	0.30

Таблица 4. Среднестатистические составы МГС из наиболее крупных месторождений и рудопроявлений России (мас.%)

№ п/п	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	MnO	MgO	n	Месторождения и рудопроявления
1	37.1	62.9	—	—	—	—	—	Теоретический состав Al ₂ SiO ₅
2	36.44	62.12	0.22	0.02	—	—	4	Кейвская группа
3	36.62	62.73	0.06	0.02	0.01	0.01	8	Хизовара
4	37.05	63.02	0.15	0.01	0.01	—	6	Малобрусянское
5	37.06	63.15	0.07	0.01	0.00	—	8	Абрамовское
6	36.60	62.42	0.32	0.00	0.01	0.01	27	Карабашское
7	36.63	62.30	0.30	0.03	—	—	2	Борисовское
8	36.85	62.51	0.41	—	0.01	0.01	8	Золотоносные пески Андрее-Юльевского прииска
9	36.87	62.38	0.47	0.01	0.01	0.01	4	Рудопроявления Сангилена
10	37.02	61.93	0.54	0.02	—	—	10	Кяхтинское
11	35.91	61.98	0.19	—	0.01	0.01	3	Китойское
12	36.44	62.72	0.20	0.01	0.01	0.01	4	Базыбайское
13	36.77	62.03	0.87	0.01	0.01	—	9	Рудопроявления Сангилена
14	36.71	62.47	0.40	0.01	0.01	0.01	17	»
15	36.59	62.88	0.24	0.01	0.01	0.03	11	Рудопроявления Заангарья

Примечание. 2—9 — кианиты, 10—13 — силлиманиты, 14—15 — андалузиты, n — число проб, по которым производилось усреднение.

Таблица 5. Теоретические составы высокоглиноземистых минералов (мас.%)

Минерал	Al ₂ O ₃	SiO ₂	FeO	H ₂ O	Al	Si	Формула
Корунд	100.0	0.0	0.0	0.0	52.9	0.0	Al ₂ O ₃
Бемит, диаспор	85.0	0.0	0.0	15.0	45.0	0.0	Al ₂ O ₃ ·H ₂ O
Муллит	71.8	28.2	0.0	0.0	38.0	13.2	3Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂
Гидрагиллит (гиббсит)	65.3	0.0	0.0	34.7	34.6	0.0	Al(OH) ₃
Анд., сил., ки.	62.9	37.1	0.0	0.0	33.3	17.3	Al ₂ O ₃ ·SiO ₂
Ставролит	53.4	28.5	17.0	1.1	28.8	13.3	Fe ₂ Al ₉ Si ₄ O ₂₃ (OH)
Хлоритоид	40.5	23.9	28.5	7.1	21.4	11.2	FeAl ₂ SiO ₅ (OH) ₂
Каолинит	39.5	46.6	0.0	13.9	20.9	21.8	Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂ ·2H ₂ O
Пирофиллит	28.3	66.7	0.0	5.0	15.0	31.2	Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂ ·2H ₂ O

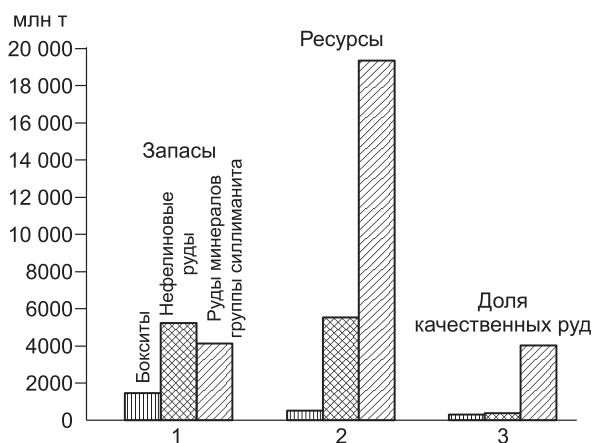
Примечание. Анд. — андалузин, сил. — силлиманит, ки. — кианит.

нием высококачественных бокситов, никакой другой вид сырья при любых способах обогащения не может дать таких концентраций Al₂O₃. По содержанию глинозема они следуют за корундом, диаспором (бемитом), гидрагиллитом (гиббситом) и муллитом (табл. 5).

Если учесть, что корунд и муллит не дают крупных скоплений, а качественных бокситов у нас практически нет, то МГС по своей значимости для глиноземной и алюминиевой промышленности нашей страны можно поставить на первое место. Тем более это справедливо, поскольку разведанные их запасы превышают запасы бокситов и нефелиновых руд (рис. 3). Месторождения МГС равномерно рас-

Рис. 3. Соотношение запасов по категориям (A+B+C₁+C₂) бокситов, нефелиновых руд и минералов группы силлиманита на 01.01.07.

1, 2 — ресурсы указанных типов руд по категориям P₁+P₂. 3 — доля качественных руд в запасах. Под качественными рудами подразумевается: для бокситов кремниевый модуль больше 10; для нефелиновых руд — их соответствие технологии АГК (Al₂O₃ > 26 мас.%), для МГС — соответствие руд международным критериям эксплуатируемых месторождений.



пределены на территории России и находятся в экономически развитых регионах (Кольский полуостров, Карелия, Урал, Красноярский край, Республика Тыва и другие районы). Практически все они могут разрабатываться открытым способом.

ВОЗМОЖНОСТИ РАСШИРЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВА ГЛИНОЗЕМА НА БАЗЕ СОВМЕСТНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ НЕФЕЛИНОВЫХ РУД И КОНЦЕНТРАТОВ МГС

Проблема дефицита глинозема в России обсуждается на протяжении многих лет. Самообеспечены им только алюминиевые заводы СУАЛа. Они имеют собственную сырьевую базу. В трудном положении находятся предприятия РУСАЛа. Сибирские бокситы для них не перспективны из-за низкого качества и относительно небольших запасов. Для обеспечения алюминиевых заводов глиноземом за счет нефелиновых сиенитов потребуется строительство, как минимум, шести-семи комбинатов, сопоставимых по мощности с Ачинским. При этом руды других месторождений по своему качеству не должны уступать кия-шалтырским, а попутная продукция должна быть реализована, но это нереально. В условиях безотходного производства на одну тонну производимого глинозема теоретически должно получаться более одной тонны содопродуктов и одиннадцать тонн цемента. Действительная же ситуация здесь такова. Ранее АГК выпускал ~4 т цемента (а сейчас и того меньше), остальные 7 т шламов шли в отвалы. Оптимальным считается производство глинозема в 200—250 тыс. т в год. В этом случае шламы можно полностью утилизировать, цемент реализовать и производство будет рентабельным.

Основные недостатки промышленного использования нефелинов состоят в больших материальных, топливно-энергетических и капитальных затратах, которые резко возрастут с привлечением руд с низким содержанием глинозема (типа горячегорских — $Al_2O_3 \approx 22\%$). По техническим условиям (МРТУ 6-12-54—80) нефелиновый концентрат должен содержать (в пересчете на сухое вещество) не менее 28.5 % Al_2O_3 и 17.5 % $Na_2O + K_2O$. Поэтому их необходимо концентрировать. Сделать это можно разными способами.

1. Обогащать нефелиновые руды. Этот способ концентрирования малоэффективен. Он позволяет получать концентраты, пригодные для переработки методом спекания, но дает низкое извлечение глинозема и большой выход хвостов (табл. 6).

2. Не обогащать нефелиновые руды, а добавлять в них бокситы. Это поднимет количество глинозема в рудной смеси и снизит расходные коэффициенты по сырью, топливу, основным и вспомогательным материалам. Однако повышенное содержание в большинстве отечественных бокситов оксидов железа и необходимость их транспортировки в Сибирь из отдаленных районов страны делает данный путь экономически и технологически нецелесообразным.

3. Вводить в качестве добавок в необогащенные нефелиновые руды минералы группы силлиманита. Последний вариант концентрирования является наиболее перспективным. Сказанное выше можно проиллюстрировать на следующем примере (табл. 7). Добавление 30 % концентрата МГС ($Al_2O_3 = 57$ мас.%) к нефелиновой породе типа горячегорской ($Al_2O_3 = 22\%$) поднимает количество глинозема в смеси до 32.5 %. Напомним, что наиболее качественные кольские нефелиновые концентраты имеют 28—29 % Al_2O_3 , кия-шалтырские руды — 27 %, лучшие способы их обогащения дают 27—30 %, теоретическое содержание глинозема в нефелине равно 35.9 %. Если же смесь составить из 60 % концентрата МГС и 40 % нефелиновой руды, то доля Al_2O_3 в ней достигнет 43 % и приблизится к его концентрации в бокситах.

Таблица 6. Результаты обогащения разных типов глиноземистых руд Сибири [Лепезин, Семин, 1989], мас. %

Тип руды	Исходная порода			Концентрат			Хвосты			Выход продукта, %
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	
Ужурские нефелиновые руды	—	21.30	12.78	—	29.70	2.10	—	19.30	15.20	19.58
	—	23.50	9.40	—	29.71	2.79	—	20.82	12.15	29.49
	—	22.13	11.14	—	28.73	3.27	—	18.78	15.58	35.74
	—	23.80	9.43	—	32.21	2.19	—	21.20	11.68	23.94
	—	20.09	11.10	—	24.66	4.73	—	16.03	16.80	46.36
	—	23.39	9.80	—	27.29	4.62	—	19.52	14.94	49.85
Силлиманитовые руды Кяхтинского месторождения	61.02	35.51	1.30	36.68	59.56	1.27	78.14	14.72	0.71	41.0
То же, Базыбайского месторождения	74.33	18.08	2.88	42.10	53.08	1.52	93.84	3.06	—	7.78
	—	—	—	40.32	55.76	0.47	92.58	3.03	0.51	21.08

Таблица 7. Химический состав нефелиновых руд, концентратов МГС и рудных смесей (мас.%)

Руда или рудная смесь	Химический состав руды или рудной смеси				
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O+K ₂ O
Кия-Шалтырская нефелиновая руда — Кн	40.30	27.00	4.40	7.90	14.00
Горячегорская нефелиновая руда — Гн	43.00	22.00	9.30	7.00	10.00
Концентрат МГС	40.06	57.07	0.61	0.06	0.46
<i>Кия-шалтырская нефелиновая руда + концентрат МГС</i>					
0.7Кн + 0.3КМГС	40.23	36.02	3.26	5.55	9.94
0.4Кн + 0.6КМГС	40.16	45.04	2.13	3.20	5.88
<i>Горячегорская нефелиновая руда + концентрат МГС</i>					
0.7Гн + 0.3КМГС	42.12	32.52	6.69	4.92	7.14
0.4Гн + 0.6КМГС	41.24	43.04	4.09	2.84	4.28

Добавки концентратов МГС увеличивают количество глинозема в смеси, одновременно снижают удельный расход нефелиновой руды, которая обеспечивает производство соды, известняка и других вспомогательных материалов. Как показали лабораторные исследования [А.с., 1980; Семин и др., 1982], при этом улучшаются и технологические качества получаемых смесей: сдвигается в низкотемпературную область процесс химического взаимодействия, расширяется площадка спекообразования, повышается пористость спеков и т. д.

Практическая реализация данного подхода позволит: 1) повысить производительность и выпуск глинозема на существующих мощностях и по существующей технологии в 1.2—1.6 раза при использовании рудной смеси с содержанием концентрата МГС 30—60 %; 2) снизить удельные капитальные затраты на расширение существующих и сооружение новых глиноземных заводов; 3) сократить выход шлама, эксплуатационные затраты на производство одной тонны глинозема, его энерго- и материалоемкость и трудозатраты; 4) повысить производительность; 5) использовать без обогащения низкокачественные нефелиновые руды. При этом переработка смесей может быть осуществлена хорошо освоенным методом спекания и на действующем оборудовании без конструирования и освоения новых его типов.

Идея совместной переработки МГС и нефелиновых руд при производстве глинозема поддержана Госпланом СССР (протокол от 30.01.1987 г.), ВАМИ (протокол технического совещания от 14.11.1986 г.; протокол № 8 отраслевой секции по производству глинозема и химической продукции от 18.03.1987 г.), Ачинским глиноземным комбинатом (протокол совещания от 13.11.1990 г.). Она подробно изложена в статье «Перспективы развития сырьевой базы алюминиевой промышленности Сибири» [Лепезин, Семин, 1989]. Поскольку технология разрабатывалась в лабораторных условиях [А.с., 1980; Семин и др., 1982, 1983], то следовало бы провести опытно-промышленные испытания.

Добыча руд на Кия-Шалтырском месторождении ведется селективно, т.е. выбираются богатые руды, а бедные идут в отвал. Добавки концентратов МГС позволяют стабилизировать содержание глинозема на требуемом технологическом уровне и продлить срок обеспеченности Ачинского глиноземного комбината сырьем на долгую перспективу.

СОЗДАНИЕ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА СИЛУМИНА И АЛЮМИНИЯ НА БАЗЕ МГС С ПРИВЛЕЧЕНИЕМ ЭЛЕКТРОТЕРМИИ

Силумин — это сплав кремния и алюминия, имеющий низкую плотность (2.4—2.7 г/см³), высокую удельную прочность при нормальной температуре и хорошие литейные свойства. Более половины всех литейных цветных сплавов, широко применяемых в оборонной промышленности, авиастроении, транспортном машиностроении и других отраслях, изготавливаются на основе силумина.

В настоящее время силумин производят сплавлением кристаллического кремния и алюминия в электрических или пламенных печах. Этот способ требует электролитического производства алюминия, характеризуется высокими затратами на получение глинозема, анодной массы, криолита, фтористого алюминия, электроэнергии, а также на капитальное строительство крупных цехов с электролизерами и преобразовательных подстанций. Альтернативой данной технологии является электротермия. В промышленных масштабах она реализована в Германии в 1926 г. компанией «Металлгезельшафт». Активно рудотермический метод разрабатывался в 20—30-х годах прошлого столетия в Швейцарии и во Франции [Беляев, 1970; Гасик и др., 1971; Гудима, Шейн, 1975]. Работы по внедрению доводились до создания полужавоцких установок и опытных заводов. Детальный обзор становления и развития электротермии в России и мире в целом дан в статье А.М. Салтыкова и А.Ю. Баймакова [2003].

Исследования велись и в нашей стране. ВАМИ разработал в лабораторных и укрупненных экспериментальных условиях двухстадийную схему передела кремнево-алюминиевого сырья. В первой стадии процесса ведется электротермическая рудно-восстановительная его плавка, во второй — полученный электротермический сплав подвергается переработке либо на алюминиевые лигатуры, либо на технически чистый алюминий. В 1934 г. на Днепровском алюминиевом заводе начали производить силикоалюминий восстановлением каолина древесным углем. В 1939 г. на том же заводе получен богатый алюминием (до 70 %) сплав. В промышленность технология внедрена в 1964 г. В 1948 г. в Центральной лаборатории Уральского алюминиевого завода получали кремнево-алюминиевые сплавы из кианитовых концентратов Абрамовского месторождения (Свердловская область). В начале 60-х годов прошлого столетия на Иркутском алюминиевом заводе велись опытно-промышленные испытания получения электротермического силумина. В качестве сырья использовались силлиманитовые концентраты Кяхтинского месторождения (Республика Бурятия).

Выплавка алюминий-кремниевого сплава ведется восстановительной плавкой брикетов, состоящих из концентрата МГС, каолина, глинозема и восстановителей, с получением в качестве промежуточного продукта сплава с 32—35 % кремния. При этом в качестве восстановителей используются смеси из древесного угля, нефтяного кокса, каменного угля, древесной золы.

По многочисленным экспертным оценкам специалистов, электротермическое получение силумина и алюминия имеет следующие преимущества [Веригин, 1958; Брусаков и др., 1965, 1978, 1981, 1987; Беляев, 1970; Гасик и др., 1971; Гудима, Шейн, 1975; Калужский и др., 1980]: (1) из производственного цикла исключается сложное и дорогостоящее производство глинозема; 2) мощность рудотермической печи намного выше мощности электролизера (одна печь производительностью в 10 тыс. т алюминия в год может заменить 30 электролизеров); 3) нет надобности преобразовывать переменный ток в постоянный, а это сокращает потери электроэнергии; 4) отпадает необходимость использовать фтористые соединения; 5) расход электроэнергии на единицу получаемой продукции снижается на 20 %, а ее себестоимость на 30 %; 6) капитальные затраты на строительство цеха с рудотермической печью на 30—40 % ниже капитальных затрат на строительство глиноземного и электролитического цехов. Производство силумина даже с использованием электролитического алюминия для разбавления дает значительный экономический эффект (табл. 8). Обратим внимание еще на одно принципиально важное обстоятельство. Поскольку сырье местное, то полностью устраняется внешняя сырьевая зависимость и к минимуму сводятся транспортные издержки.

Таблица 8. Технико-экономические показатели электротермического способа получения алюминия и его сплавов по сравнению с электролитическим [Костюков и др., 1974]

Показатель на одну тонну продукта, %	Литейные алюминиевые сплавы	Деформируемые сплавы и алюминий	Силумин, получаемый разбавлением
Снижение капитальных вложений	30—40	30—35	10—12
Снижение себестоимости	25—35	15—25	8—10
Снижение расхода электроэнергии	10—15	—	5—7
Повышение производительности труда	20—40	—	10

Таблица 9. Разведанные запасы и прогнозные ресурсы руд, МГС (Al_2SiO_5), глинозема и алюминия (тыс. т) в России [Лепезин, 2003, 2004, 2005]

Район	Руда	Al_2SiO_5	Al_2O_3	Al
<i>Разведанные запасы (категории C₂, C₁, B, A)</i>				
Кольский полуостров	3400000	1186879	676518	358556
Карелия	116820	25000	14250	7553
Урал	66684	11710	6675	3537
Сибирь	511750	13109	74732	39608
Итого разведанных запасов	4095254	1236698	772175	409254
<i>Прогнозные ресурсы (категории P₂, P₃)</i>				
Кольский полуостров	11000000	3840000	2188230	1159762
Урал	109890	30000	17100	9063
Сибирь	8138400	2588517	1475455	781991
Итого ресурсов	19248290	6458517	3680785	1950816

Технология электротермии ведет к снижению удельных и капитальных затрат. При этом доля их снижения напрямую зависит от единичной мощности рудотермической печи. Широкие перспективы ее увеличения открывает использование плазменного нагрева, который к предлагаемому способу производства алюминия и его сплавов позволяет [Калужский и др., 1978, 1980]: 1) получать высокие температуры при большой концентрации энергии в реакционном пространстве; 2) стабилизировать электрический режим работы печи при его независимости от электрических свойств шихты; 3) создавать высокое напряжение на плазменной дуге, позволяющее привлекать плазмотроны большей мощности при сравнительно небольшой силе тока; 4) работать в широком диапазоне температур в любой среде. При этом в качестве плазмообразующих могут использоваться аргон, водород, воздух, природный газ и их смеси.

По имеющимся публикациям, в случае применения плазмотрона в плавильном агрегате примерный расход электроэнергии составит 10—12 тыс. кВт/ч на одну тонну кремний-алюминиевого сплава. Для сравнения отметим, что расход электроэнергии при электролитическом производстве одной тонны алюминия превышает 16 тыс. кВт/ч.

Если технология электротермического получения силумина и алюминия из МГС разработана, является эффективной, экономически оправданной и апробирована в промышленных масштабах, то почему это производство не развивается в нашей стране? Разве у нас нет подобного вида сырья? Напротив, его ресурсы измеряются миллиардами тонн. Наиболее крупные их скопления сконцентрированы в четырех провинциях (Кейвы — Кольский полуостров, Карелия, Урал, Сибирь). Разведанные запасы МГС в пересчете на конечный продукт — алюминий превышают 400 млн т (табл. 9). Если его производить в количестве 4 млн т в год, как это делается сейчас, то руд хватит более чем на 100 лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сопоставив объемы производства алюминия и глинозема (в 2008 г. 4.4 и ~3.0 млн т соответственно), получаем дефицит Al_2O_3 примерно в 5 млн т, причем приходится он в основном на сибирские алюминиевые заводы. Решить проблему дефицита при существующих объемах производства алюминия за счет отечественных бокситов, нефелиновых руд (традиционные сырьевые источники для нашей страны), сынныритов, анартозитов, золоотвалов и каолинов невозможно. Бесперспективным является и вариант обеспечения потребностей алюминиевых заводов глиноземом за счет его импорта из стран ближнего и дальнего зарубежья. Выход из создавшегося положения только один — вовлекать новые виды сырья с применением новых технологий. Таким сырьем являются минералы группы силлиманита. Их можно перерабатывать совместно с относительно бедными нефелиновыми рудами или напрямую получать из них силумин и алюминий с использованием электротермии минуя стадию производства глинозема.

Само собой разумеется, что создать крупномасштабное электротермическое производство силумина и алюминия в короткий срок невозможно, поэтому предлагается следующая последовательность проведения конкретных мероприятий для постепенного перехода от одного вида сырья к другому и от одной технологии к другой.

1. Освоить месторождение МГС с производительностью концентрата в 10—30 тыс. т в год. Оно должно находиться в районе с развитой инфраструктурой и недалеко от железной дороги. Такие месторождения в России имеются, на их освоение потребуются один-два года и относительно небольшие капитальные затраты.

2. Создать промышленное производство концентратов МГС. Дело это беспроигрышное, так как на данную продукцию есть спрос в огнеупорной, керамической и в других отраслях народного хозяйства.

3. Провести опытно-промышленные испытания по электротермическому производству кремний-алюминиевых сплавов и алюминия из концентратов МГС.

4. По мере получения результатов далее можно переходить к освоению крупных месторождений минералов группы силлиманита и к созданию промышленных производств силумина и алюминия.

Работа выполнена при поддержке СО РАН (интеграционный проект № 139) и МПР России (государственный контракт от 21.04.2008 № АВ-11-03/31) и Президиума Российской академии наук (программа № 23).

ЛИТЕРАТУРА

Алюминиевая промышленность России в рыночных условиях / Ред. В.В. Кулешов. Новосибирск, ИЭиОП СО РАН, 1997, 142 с.

А.с. 734952 СССР. Способ переработки низкокачественного щелочного алюмосиликатного сырья / Семин В.Д., Медведев Г.П., Семина З.Ф. Опубл. в Б.И., 1980, № 18.

Беляев А.И. Металлургия легких металлов. М., Metallurgia, 1970, 365 с.

- Броневой В.А., Ланкин В.П.** Состояние и возможные направления развития сырьевой базы алюминиевой промышленности России // Цветные металлы, 2001, № 3, с. 19—54.
- Брусаков Ю.И., Веригин В.М., Варюшенков А.И., Чельцов В.М.** Опытнo-промышленные испытания и крупнолабораторные исследования по электротермическому получению алюминиево-кремниевых сплавов и переработке их на силумин // Труды ВАМИ, 1965, № 54—55, с. 242—256.
- Брусаков Ю.И., Ржавин С.А., Чесноков В.А.** Сравнительная эффективность использования кремнезем-глиноземистого сырья при электротермическом производстве алюминиево-кремнистых сплавов // Труды ВАМИ. Литье и обработка алюминия, 1978, № 102, с. 64—70.
- Брусаков Ю.И., Варюшенков А.И., Володатский В.Ф.** Усовершенствование технологии производства кремния в алюминиево-кремниевых сплавах в печах большой мощности // Труды ВАМИ. Научные исследования и опыт проектирования в металлургии легких сплавов, 1981, с. 110—116.
- Брусаков Ю.И., Гпазатов А.Н., Запщинский И.С.** Изучение условий шлакообразования при электротермическом производстве алюминиево-кремниевых сплавов // Труды ВАМИ. Интенсификация производства продукции из алюминия, кремния и их сплавов, 1987, с. 67—77.
- Веригин В.Н.** Электротермический способ получения алюминия и его сплавов // Труды Вост.-Сиб. филиала АН СССР, 1958, т. 2, вып. 13, с. 72—86.
- Гасик М.И., Емлин Б.И., Климович Н.С., Хитрик С.И.** Электроплавка алюмосиликатов. М., Металлургия, 1971, 304 с.
- Гудима Н.В., Шейн Я.П.** Краткий справочник по металлургии цветных металлов. М., Металлургия, 1975, 535 с.
- Калужский Н.А., Козлов В.М., Останин Ю.Д., Черняховский Л.В.** Использование плазменного нагрева для восстановления глиноземсодержащих материалов при получении алюминиевых сплавов // Труды ВАМИ. Литье и обработка алюминия, 1978, № 102, с. 59—63.
- Калужский Н.А., Добаткин В.И., Гопиенко В.Г.** Перспективы электротермического производства алюминиевых сплавов // Цветные металлы, 1980, № 1, с. 40—50.
- Кальченко В.С.** О тарифах на электроэнергию, грузовые железнодорожные перевозки и их влияние на конкурентоспособность российской металлопродукции // Цветные металлы, 2001, № 12, с. 60—62.
- Костюков А.А., Киль И.Г., Никифоров В.П.** Справочник металлурга по цветным металлам. Производство алюминия. М., Металлургия, 1974, 560 с.
- Лайнер А.И., Екимов С.В.** К вопросу разложения кианита по способу спекания с известняком // Изв. вузов. Цветная металлургия, 1972, № 4, с. 30—37.
- Лепезин Г.Г.** Месторождения и рудопроявления минералов группы силлиманита России и перспективы создания на их базе промышленного производства концентратов // Огнеупоры и техническая керамика, 1997а, № 8, с. 27—32.
- Лепезин Г.Г.** Кианит — материал XXI века // Газета «Челябинский рабочий» от 6 сентября 1997 года. 1997б.
- Лепезин Г.Г.** Есть ли будущее у российского алюминия // ЭКО, 2003, № 5, с. 144—159.
- Лепезин Г.Г.** Стратегия развития сырьевой базы алюминиевой промышленности России // Химия в интересах устойчивого развития, 2004, № 12, с. 501—516.
- Лепезин Г.Г.** Состояние сырьевой базы алюминиевой промышленности России и стратегия ее развития // Маркшейдерия и недропользование, 2005, № 2, с. 19—24.
- Лепезин Г.Г., Горюнов В.А.** Области применения минералов группы силлиманита // Геология и геофизика, 1988 (5), с. 80—88.
- Лепезин Г.Г., Семин В.Д.** Перспективы развития сырьевой базы алюминиевой промышленности Сибири // Геология и геофизика, 1989 (2), с. 85—95.
- Лепезин Г.Г., Шерман М.Л., Семин В.Д., Кравцов И.С.** Перспективы использования метаморфических пород Алтае-Саянской складчатой области и Енисейского кряжа как источника высокоглиноземистого сырья // Геология и геофизика, 1979 (11), с. 35—43.
- Лепезин Г.Г., Семин В.Д., Степанов С.А., Медведев Г.П., Семина З.Ф.** Базыбайское месторождение кварц-силлиманитовых руд (геология, петрохимия, промышленные залежи) // Геология и геофизика, 1989 (6), с. 80—87.
- Лепезин Г.Г., Перепелицин В.А., Покусаев В.И.** Перспективы организации промышленного производства кианитовых концентратов на Урале // Огнеупоры и техническая керамика, 1996, № 8, с. 17—19.
- Лепезин Г.Г., Сокол Э.В., Жираковский В.Ю., Френкель А.Э., Осипов В.А.** Месторождения и рудопроявления кианита Среднего и Южного Урала // Огнеупоры и техническая керамика, 1997, № 2, с. 29—33.

Лепезин Г.Г., Семин В.Д., Степанов С.А. Предприятия РУСАЛа ожидает сырьевой кризис // Газета «Континент Сибирь», 2003, № 25.

О состоянии использования минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2006 году. Государственный доклад, МПР, 2007 г.

Прокопов И.В. Алюминиевая промышленность России и мира на рубеже веков. Прогнозы роста и потребления // Цветные металлы, 2002, № 2, с. 70—77.

Пурденко Ю.А. Алюминиевая промышленность России: состояние, проблемы и перспективы развития. Иркутск, Вост.-Сиб. кн. изд-во, 1997, 136 с.

Салтыков А.М., Баймаков А.Ю. Становление и развитие электротермического производства алюминий-кремниевых сплавов // Цветные металлы, 2003, № 7, с. 101—104.

Семин В.Д., Медведев Г.П., Семина З.Ф., Урванцев В.В. Изыскание эффективной технологии комплексной переработки низкокачественных алюмосиликатных пород // Научные основы комплексного использования руд и концентратов. М., ЦМЕТ АН СССР, 1982, ч. 1, с. 54—60.

Семин В.Д., Медведев Г.П., Семина З.Ф. Пути вовлечения в производство низкокачественных алюмосиликатных руд // Изв. вузов. Цветная металлургия, 1983, № 4, с. 43—45.

Сизяков В.М. Состояние алюминиевой промышленности России. Проблемы. Перспективы развития. Аналитический обзор // Записки Горного института, 1999, с. 123—144.

*Рекомендована к печати 12 мая 2010 г.
Н.П. Похиленко*

*Поступила в редакцию 20 ноября 2009 г.,
после доработки — 26 апреля 2010 г.*