

ГЕОЛОГИЯ

УДК: 553.493.6

МЕСТОРОЖДЕНИЯ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ – ПЕРСПЕКТИВНЫЙ СТРАТЕГИЧЕСКИЙ РЕСУРС РОССИИ

© Анисимов Л.А.¹, Донцова О.Л.²

1 – Волгоградский государственный университет, Волгоград

2 – Кубанский государственный университет, Краснодар

DOI:10.24412/1997-8316-2023-112-11-20

Аннотация: представлен обзор ситуации, связанной с перспективами развития добычи и переработки залежей редкоземельных элементов на территории Российской Федерации. Рассмотрены природные и техногенные месторождения, особенности их освоения. Обращено внимание на ресурсы Прикаспийского региона, связанные с отвалами фосфогипса, горючих сланцев и другими продуктами переработки полезных ископаемых.

Ключевые слова: редкоземельные элементы, месторождения, добыча, отвалы, фосфогипс, горючие сланцы.

E-mail: anisimov@volsu.ru

DEPOSITS OF RARE EARTH ELEMENTS ARE A PROMISING STRATEGIC RESOURCE OF RUSSIA

© Anisimov L.¹, Dontsova O.²

1 – Volgograd State University, Volgograd

2 – Kuban State University, Krasnodar

Abstract: an overview of the situation related to the prospects for the production and processing of rare earth element deposits in the territory of the Russian Federation is presented. Natural and man-made deposits, features of their development are considered. Attention is drawn to the resources of the Caspian region associated with the dumps of phosphogypsum, oil shale and other products of mineral processing.

Key words: rare earth elements, deposits, production, dumps, phosphogypsum, oil shale.

К редкоземельным элементам (РЗЭ) относятся иттрий, лантан и элементы группы лантаноидов (церий, празеодим, неодим, самарий, европий, гадолиний, тербий, диспрозий, гольмий, эрбий, тулий, иттербий, лютеций). Лантаноиды образуют непрерывный ряд от лантана до лютеция. Крайние элементы ряда – наиболее легкие (лантан, церий) и наиболее тяжелые (иттербий и лютеций), заметно отличаются друг от друга, что создает возможность их разделения (фракционирования) в природе и в технологических процессах в зависимости от изменения физико-химических параметров. Эти элементы активно используются в радиоэлектронике, авиационном и ракетном приборостроении.

Особое внимание на редкоземельные металлы было обращено после резкого роста их стоимости в 2010 году. Килограмм неодима, который используют в производстве

наушников и гибридных электромобилей, в начале десятилетия стоил \$42, через год \$283, т.е. цена выросла почти в семь раз. Цена килограмма самария увеличилась с \$18,5 до \$146.

Основным лидером на рынке редкоземельных металлов в 1980-е годы стал Китай, имеющий не только перспективные месторождения с высокой долей содержания металлов в руде, но и дешевую рабочую силу. Стоимость добычи в КНР была намного ниже, чем в США, которые лидировали в секторе прежде, к тому же Китай активно субсидировал затраты компаний. Страна, располагая самыми большими разведанными запасами РЗЭ (44 млн тонн) и самым большим их производством (132000 тонн в год), доминирует на рынке. Общемировое производство составило 210000 тонн в 2019 году, а мировые запасы – 120 млн тонн. Ближайшие конкуренты



Рис. 1. Крупнейший в мире рудник лёгких редкоземельных элементов смешанного типа Баян-Обо, автономный район Внутренняя Монголия.

Китай – США (26000 тонн в год), Мьянма (22000 тонн), Австралия (21000 тонн). Есть ряд стран, среди которых Россия и Индия, с производством менее 3000 тонн за 2019 год.

МЕСТОРОЖДЕНИЯ, ДОБЫЧА И ОБОГАЩЕНИЕ

Источниками редкоземельных элементов являются магматические и метаморфические породы. Из 250-ти минералов только 60-65 содержат окислы РЗЭ с превышением 5-8%. Основные – монацит (Ce , La) PO_4 , ксенотим YPO_4 , бастнезит $\text{Ce}[\text{CO}_3](\text{OH}, \text{F})$, паризит $\text{Ca}(\text{Ce}, \text{La})_2 [\text{CO}_3]3\text{F}_2$, гадолинит $\text{Y}_2\text{FeBe}_2\text{Si}_2\text{O}_{10}$, ортит $(\text{Ca}, \text{Ce})_2 (\text{Al}, \text{Fe})_3\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{O}, \text{OH})$, лопарит $(\text{Na}, \text{Ca}, \text{Ce})(\text{Ti}, \text{Nb})\text{O}_3$, эшинит $(\text{Ce}, \text{Ca}, \text{Th})(\text{Ti}, \text{Nb})_2\text{O}_6$. Наиболее распространен в земной коре церий, наименее – тулий и лютеций. Главные концентраты РЗЭ: бастнезит (CeCO_3F) и монацит (CePO_4), 70% добываемых РЗЭ приходится на долю этих руд. Наиболее богатые месторождения бастнезита находятся в КНР и США, монацита – в Австралии, Бразилии, Индии, Малайзии, ЮАР, Шри-Ланке, Таиланде, США [3,11,13].

Породообразующие минералы (слюды, плагиоклазы) в условиях химического выветривания трансформируются в глинистые минералы. При этом большая часть высвобождающихся РЗЭ сорбируется глинистыми минералами, а меньшая часть поступает в раствор. В связи с этим глинистые минералы в коре выветривания этих месторождений являются одним из главных носителей РЗЭ.

На основе минералогических исследований пород гипергенного происхождения установлено изоморфное вхождение РЗЭ в состав реликтовых эндогенных породообразующих минералов – граната, апатита, ортита и др., которые концентрируются в новообразованных гипергенных минералах: черчите, иттрорабдофаните и неодимовом бастнезите. Они адсорбируются гипергенными глинистыми породами.

Выветривание – важнейший процесс дальнейшего обогащения тяжелых РЗЭ, что превращает изверженную породу в экономически извлекаемое рудное тело. Теплый и влажный климат вместе со слабокислой почвой в субтропических зонах способствует формированию залежей редкоземельных элементов. Комбинация интенсивного химического, физического и микробиологического выветривания позволяет мигрировать РЗЭ из верхнего более кислотного, полностью выветрившегося слоя вниз с дождевой водой и, в конечном итоге, приводит к их накоплению в нижнем менее кислом, умеренно выветренном слое. РЗЭ образуют более стабильный комплекс в почве с высоким рН.

Кроме того, интенсивное выветривание в субтропических районах (например, Южный Китай) в сочетании с денудацией постоянно удаляет значительный объем выщележащих образований из системы выветривающихся пород, что сопровождается развитием более полного профиля выветривания, а также накоплению РЗЭ. В настоящее время редкоземельные элементы широко применяются для реконструкции условий и обстановок образования осадочных и метаморфических горных пород. Тем самым предопределяется возможность по характеру распределения РЗЭ судить о физико-химических особенностях процессов формирования горных пород и минералов [3,11,13].

Разведанные мировые запасы РЗЭ на конец 2008 г. составляли порядка 130 млн т, Китай – 89, СНГ – 21, США – 14, Австралия – 5,8, Индия – 1,3, Бразилия – 0,84 тыс. т. В июле 2011 г. на глубинах 3500-6000 м в 78-ми донных участках Тихого океана к западу и востоку от Гавайев, а также к востоку от Таити и Французской Полинезии обнаружены обширные залежи редкоземельных металлов (РЗМ) с запасами в 80-100 млрд т.

Необходимо отметить, что добыча РЗЭ крайне дорогостоящее предприятие, так как элементы трудно обнаружить при концентрации, которая бы оправдала работы

с экономической точки зрения. Кроме того, для выработки даже относительно малого количества РЗМ требуется извлечь и переработать большой массив руды, что связано с образованием огромных отходов и масштабным загрязнением окружающей среды из-за потребления большого количества воды и использования токсичных материалов в процессе очистки (рис.1). Для государства с высокой плотностью населения это чрезвычайно сложная задача.

МЕСТОРОЖДЕНИЯ В РОССИИ

В настоящее время в России осваивается только Ловозерское месторождение на Кольском полуострове, где добывают комплексные лопаритовые руды, содержащие, помимо РЗЭ, тантал, ниобий и титан. На единственном в стране Соликамском магниевом заводе из обогащенной руды получают промежуточный продукт – коллективный карбонатный концентрат РЗМ. Чтобы извлечь металлы, нужно разделить концентрат на оксиды. Предприятий, способных это делать в промышленных масштабах, в России нет. После распада Советского Союза они достались Казахстану и Эстонии.

В качестве попутных компонентов редкие земли также извлекают из апатит-нефелиновых руд ряда месторождений Мурманской области. Хотя по запасам в России Мурманская область занимает лидирующее положение, однако её руды бедные. На втором месте находятся более богатые руды месторождений Якутии, далее идет Иркутская область, Коми, Забайкальский край, Донецкая и Запорожская области, Тува, Красноярский край.

Для месторождений Иркутской области (Зашихинское и Томтор) составлен план добычи РЗМ. Запасы Зашихинского месторождения оцениваются в 33,5 млн тонн руды с высоким содержанием ниобия и тантала. Лицензией на месторождение владеет компания «Техноинвест Альянс». Запустить производство планируется в 2023 г. Месторождение Томтор находится в Арктической

зоне на северо-западе Якутии. Его разработка позволит обеспечить Россию РЗМ на период свыше 100 лет. Из 1 т руды Томтора можно получить до 1,0 кг скандия, 0,8 кг европия, 0,2 кг тербия, 1,5 кг диспрозия, 6 кг празеодима и более 20 кг неодима. Имеются и другие РЗМ. Разработана эффективная опытно-промышленная технология перевода более 75% руды в товарную продукцию.

ТЕХНОГЕННЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Привлечение отходов различных производств для извлечения полезных компонентов имеет ряд преимуществ по сравнению с освоением природных месторождений. Эти отходы находятся на обжитых территориях с действующей инфраструктурой, что существенным образом влияет на размер необходимых инвестиций. К перспективным для извлечения редкоземельных металлов техногенным образованиям относятся отвалы фосфогипса, золы и шламы, образующиеся при сжигании горючих сланцев, бурых и каменных углей на тепловых электростанциях, красный шлам и другие отходы металлургических производств.

ФОСФОГИПС

По разным оценкам на сегодняшний день в отвалах предприятий России накоплено около 200 миллионов тонн фосфогипса. Это отходы при переработке апатитового концентрата в фосфорные удобрения. Огромные горы фосфогипса образовались в районе г. Балаково Саратовской области (рис.2). В зависимости от технологической схемы производства в фазу фосфогипса переходит от 50 до 90 % РЗЭ. Почти за 90 лет в Хибинах извлечен 1 млрд 550 млн т руды (примерно половина промышленных запасов), выработано 620 млн т апатитового концентрата. При этом не извлечено в промышленном масштабе ни одной тонны РЗЭ. Редкоземельных металлов в этих отвалах никак не меньше 100 тысяч тонн, среди них церий, лантан, неодим, европий и иттрий.

Стоимость металлов на мировом рынке составляет \$11,6-1640 за килограмм. Сейчас эти РЗЭ попадают либо с удобрениями на поля, либо в техногенный отход производства, как фосфогипс [7.10].

Основным способом очистки фосфогипса от примесей РЗЭ служит их выщелачивание минеральными кислотами. Наиболее широкое распространение получили способы выщелачивания растворами серной кислоты, так как она является относительно дешевым реагентом, не вносящим при выщелачивании никаких дополнительных ионов, нежелательных при производстве строительных материалов. Отвалы фосфогипса создают серьезные экологические проблемы, поэтому вовлечение их в переработку решит не только вопрос выбора новых сырьевых источников РЗЭ, но и ряд проблем, связанных с загрязнением окружающей среды вредными примесями фтора, фосфора, стронция и др.

В настоящее время прорабатываются различные варианты вовлечения в переработку фосфогипса с целью извлечения РЗЭ. Содержание РЗЭ в апатите около 1%, однако, учитывая масштабы его переработки, этот источник может обеспечить внутренние и экспортные потребности России [7]. В качестве базового сценария намечается создание производства 5-7 тыс. т редкоземельных элементов в год, а оптимистический сценарий предусматривает производство 12-15 тыс. т РЗЭ в год. На российские заводы поступает свыше 4 млн т хибинского апатитового концентрата, в котором содержится 40000 т оксидов РЗЭ. Запасы хибинского апатита велики, они могут обеспечить на многие годы работу предприятий страны. Проведенные исследования [5] касаются попутного получения РЗЭ при сернокислотной переработке хибинского апатитового концентрата. Их реализация на действующих предприятиях



Рис. 2. Отвалы фосфогипса, г. Балаково

позволит получать свыше 22000 т оксидов редкоземельных элементов, отказавшись от высокочатратного освоения месторождений, расположенных в труднодоступных и малообжитых районах страны. Освоение производства редкоземельных элементов из апатитового концентрата обеспечит полное удовлетворение текущих и перспективных потребностей России в редкоземельной продукции, создаст потенциал для ее экспорта, повысит комплексность и экономическую эффективность переработки апатитового концентрата, улучшит экологическую обстановку в районах деятельности предприятий, перерабатывающих апатитовый концентрат серноокислотным методом.

ОТХОДЫ ГОРЮЧИХ СЛАНЦЕВ

Горючие сланцы отличаются высокими концентрациями микроэлементов, значительная часть которых превышает кларковые [2,12]. Наиболее высокие содержания микроэлементов установлены для горючих сланцев Средней Азии: на Байсунском месторождении и ряде месторождений сузакского горизонта, где их сумма (5-7 кг/т) в 5 раз выше среднего, а содержание Мо и V превышает 1000 г/т. На Байсунском месторождении (палеоген) содержания большого количества микроэлементов (в расчете на сухое вещество сланца) превышают их кларки: Yb, Co, Be, Ni, V, Ag, Mo, Re. Высоким содержанием Re отличаются и другие типы горючих сланцев, такие как кукерситы Прибалтики и горючие юрские сланцы Волжско-Печорской провинции.

В ходе исследований горючих сланцев центральной части Волжского сланцевого бассейна установлены высокие содержания рения (Re) до 0,22 г/т и ряда редких элементов (Se, Mo) [6, 9]. При анализе различных вещественных фракций горючих сланцев (глинистое вещество, минеральная часть, сульфиды) по трем пробам с разреза Кашпирского месторождения впервые было установлено, что Re совместно с V, Mo, Ni, фосфором и титаном ассоциирует с гли-

нистым и органическим веществом сланцев, тогда как с сульфидной частью пород – Zn, Pb, Sc, Ge, V и железо.

Больше половины от исходных количеств Re и Mo концентрируется в остатке после извлечения органических фракций, представляющего собой смесь минеральной части сланца с нерастворимым органическим веществом. Было также установлено, что существенная часть Re (до 45-68%) и Mo (до 67-82%) извлекается растворами соляной, щавелевой и винной кислоты. Связь рения с органическим веществом сланца может быть объяснена его способностью образовывать координационные соединения с различными функциональными группами, содержащимися в органическом веществе сланцев. По данным Е.М. Поплавко и др. [8], Re в горючих сланцах Средней Азии находится в форме легко извлекаемой водными, окислительными и спиртовыми растворами. По предположению авторов этой работы, Re, V и Ni в сланцах связаны преимущественно с порфириновыми соединениями. Содержания Re в кукерситах Прибалтики изменяются от < 0,05 до 0,06 мг/кг, в сланцах Поволжья от 0,4 до 0,6 мг/кг [9].

ЗОЛА УГОЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

В настоящее время в мировой практике угольные месторождения все чаще рассматриваются не только как топливно-энергетическое сырьё, но и в качестве перспективного источника большой группы редких, рассеянных и благородных металлов [1]. В многочисленных публикациях показано, что отходы использования углей могут содержать высокие, в отдельных случаях промышленно значимые концентрации элементов примесей германия, галлия, молибдена. Например, в Великобритании в течение 20 лет германий извлекался из золы и шлаков ТЭЦ, работающих на бурых углях, содержащих 0,01% германия. В условиях избытка воздуха большая часть германия концентрировалась в шлаках (52%) и золе (19%), при

недостаточном доступе воздуха (на газогенераторных установках) в пыли дымоходов (75%), золе и шлаках (25%). Производство было прекращено в связи с переводом ТЭЦ на газовое топливо в середине 1970-х годов.

Ежегодная добыча угля в Кузбассе в последние годы составляет более 150 млн т. Если принять среднюю зольность угля за 10%, то ежегодное накопление золошлаковых отходов составит примерно 15 млн т. Переработка золошлаковых отходов на одной промышленной установке может дать до 1000 т ценных металлов в год [1]. Следовательно, попутные полезные компоненты углей Кузбасса можно считать перспективной местной минерально-сырьевой базой ряда ценных металлов (галлия, германия, ванадия, вольфрама, скандия), а учитывая

высокие содержания (до 500 г на тонну в угле) титана и циркония, их можно считать перспективными для народного хозяйства страны.

КРАСНЫЙ ШЛАМ

Красный шлам – твердые отходы промышленной переработки бокситов для получения алюминия. Общее количество красного шлама в шламохранилищах отечественных алюминиевых заводов превышает 200 млн т и постоянно растет, поскольку на тонну товарного алюминия образуется около трех тонн красного шлама.

Известно, что до 95% содержащихся в бокситах редких металлов, включая скандий и РЗМ, при получении глинозема переходят в красный шлам, пульпа которого



Рис. 3. Отвалы Кашпирского месторождения горючих сланцев

содержит до 40 % железа, до 16 % алюминия, титан, редкие элементы, в том числе до 0,21 % лантанидов со значительной долей иттрия и до 0,012 % скандия. На выходе красного шлама получается примерно вдвое больше, чем алюминия. В красный цвет шлам окрашивает оксид железа, который составляет до 60 % массы. Оставшиеся 40 % составляют оксиды кремния и различных металлов, от титана до редкоземельных элементов. Красный шлам отличается высокой щелочностью с рН от 10 до 13. Утилизация красного шлама является одной из основных проблем, возникающих при производстве алюминия. Неправильная утилизация и преднамеренный выброс красного шлама в реки и озера наносит вред окружающей среде. Дождевая вода, вымытая из прудов с красным шламом, увеличивает рН вод рек и потоков, делая их резкощелочными. Орошенная их водами земля превращается в солончак.

КУЛАРИТ

Куларит (разновидность монацита), содержится в хвостохранилищах, образовавшихся в результате золотодобычи в Якутии, характеризуется повышенным содержанием средних (до 5 %) и тяжелых (до 2 %) лантанидов и низким содержанием тория. Разработанная гравитационно-магнитная схема обогащения позволяет получать из хвостов 90%-й куларитовый концентрат с содержанием 52,5 % суммы редких земель и 0,95 % TbO_2 , при извлечении в 72 %. На территории Солурского россыпного узла находится более десяти отработанных золото-редкоземельных россыпей, что позволяет рассчитывать на значительное увеличение запасов куларита, обеспечивающих получение сотен тонн в год редкоземельной продукции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Роль РЗЭ в развитии высоких технологий и серьезные экономические и экологические проблемы, связанные с добычей,

переработкой и использованием РЗМ, сделали это направление одним из важнейших факторов мировой политики [4]. Рынок редкоземельных металлов является молодым товарным рынком в мире, за прошедшие 50 лет объем мирового производства и потребления РЗМ увеличился примерно в 27 раз – с 5 до 135 тыс. т в год, что стало следствием как глобального экономического роста, так и развития новых технологий. Китай первый почувствовал эту тенденцию и начал развивать данную отрасль еще 30 лет назад, накопив огромный багаж опыта и знаний. Сотни тысяч китайских студентов прошли через зарубежные университеты, создав тем самым армию высококвалифицированных специалистов. Ежегодно многочисленные геологические «бригады» отправляются на поиски новых залежей РЗЭ в глинистых толщах различных районов Китая. Сегодня рынок товаров, где используются РЗЭ, оценивается в триллионы долларов. Не удивительно, что Китай широко использует этот рычаг в своей политике.

Россия, обладая крупной минерально-сырьевой базой РЗМ, полностью зависима от импорта этого стратегического сырья. Месторождения не осваиваются, а разделительные предприятия до сих пор не строятся, хотя было много предложений. Последние многообещающие новости связаны с распоряжением правительства РФ в 2022 г. "Редкие и редкоземельные металлы включены в перечень основных видов стратегического минерального сырья, который утвержден распоряжением правительства от 30 августа 2022 г., – сказал директор по технологическому развитию ГК "Росатом" Андрей Шевченко. – Текущая ситуация в отрасли не вызывает у нас эйфории, но мы не считаем ее безнадежной и работаем над ней. В настоящее время сохраняются проблемы в части разделительных мощностей промышленного масштаба, позволяющих производить индивидуальные оксиды РЗМ. Второе, что нас сдерживает, – невысокое внутреннее потребление. Мы будем нара-

щивать внутреннее потребление и выходить на внешний рынок, где действует очень жесткая конкуренция со стороны других стран-производителей, прежде всего Китая" (РИА новости 06.12.2022).

Согласно многочисленным аналитическим заключениям, потенциал российской сырьевой базы РЗМ может обеспечить любой уровень их товарной добычи, но он практически не используется. В первую очередь это связано с низким внутренним спросом на РЗМ в силу неразвитости собственного производства конечной высокотехнологичной продукции. В России отсутствуют промышленные предприятия, способные осу-

ществлять разделение коллективных соединений РЗМ на товарные индивидуальные оксиды, вследствие чего даже относительно небольшие объемы получаемой из собственного сырья РЗМ-продукции промежуточного передела экспортируются.

Перед Россией в настоящее время стоит проблема выбора своего места в процессе развития мировой редкоземельной промышленности. Для возрождения отечественного редкоземельного производства необходимо, прежде всего, решить вопросы выбора наиболее рентабельных сырьевых источников и создания разделительных мощностей.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Арбузов С.И., Ершов В.В. Геохимия редких элементов в углях Сибири/Томск: Изд. дом «Д Принт», 2007 – 468 с.
2. Абрамов В. В. Роль углеродистого вещества в черносланцевых породах центральной части Тим-Ястребовской структуры ВКМ в концентрации благородных металлов // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Геология. – 2006. – Вып. 1. – С. 101–107.
3. Балашов Ю.А. Геохимия редкоземельных элементов . – М.: Наука, 1976, 268 с.
4. Быховский Л.З., Пикалова В.С., Лихникевич Е.Г. Редкоземельное и скандиевое сырье: алгоритм освоения природных и техногенных источников. /Труды научно-практической конференции «Минерально-сырьевая база металлов высоких технологий. Освоение, воспроизводство, использование». – М.: ФГБУ «ВИМС», 2020, С. 24-33
5. Даминов Р.Р., Курбангалеева М.Х. Извлечение редкоземельных элементов из фосфогипса/Башкирский химический журнал. – 2021. – Том 28. – № 4. – С. 90-92
6. Илясов В.С., Староверов В.Н., Воробьева Е.В., Решетников М.В. Геохимическая характеристика горючих сланцев волжской сланценоносной толщи в связи с прогнозированием промышленных концентраций рения // Изв. Саратовского ун-та. Нов. сер. Сер. Науки о Земле. – 2017. – Т. 17, вып. – 3. – С. 165–170.
7. Локшин Э.П., Тареева О.А. Разработка технологий извлечения редкоземельных элементов при сернокислотной переработке хибинского апатитового концентрата на минеральные удобрения./Апатиты: КНЦ РАН, 2015. – 268 с.
8. Поплавко Е.М., Иванов В.В., Орехов В.С., Тархов Ю.А. Особенности металлоносности горючих сланцев и некоторые предположения об их генезисе // Геохимия. – 1978. – № 9. – С. 1411–1418.
9. Самойлов А.Г., Илясов В.Н., Зозырев Н.Ю., Шелепов Д.А. Рений в волжских (титонских) отложениях центральной части Волжского сланцевого бассейна // Недра Поволжья и Прикаспия. – 2015. – № 84. – С. 53–57.
10. Самонов А. Е., Ваньшин Ю. В. Редкоземельная и радиоактивная составляющая Балаковского фосфогипса и связанные с ней проблемы. //В сб. "Геологические науки-2007"//Матер. науч. конф. - Саратов: СГУ, 2007. – С. 63-64.
11. Шатров В.А. Лантаноиды как индикаторы обстановок осадкообразования (на основе анализа опорных разрезов протерозоя и фанерозоя Восточно-Европейской платформы). Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук. – Москва, 2007. –36 с.
12. Шпирт М.Я., Пунанова С.А. Нефти и сланцы как источник промышленного получения потенциально ценных элементов // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 4. – С. 58–62.
13. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Основы литохимии. – Санкт-Петербург: Наука, 2000. – 479 с.