

Научная статья
УДК 553.9:553.493(571)
DOI: 10.37102/0869-7698_2023_231_05_3
EDN: PAILZZ

Редкометалльный потенциал углей Сибири и Дальнего Востока России и перспективы его освоения

С.И. Арбузов✉, И.Ю. Чекрыжов, И.А. Тарасенко

Сергей Иванович Арбузов

доктор геолого-минералогических наук
старший научный сотрудник, заместитель директора
Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия
профессор
Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск,
Россия
siarbusov@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0001-6378-4103>

Игорь Юрьевич Чекрыжов

научный сотрудник
Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия
chekr2004@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0002-0319-8759>

Ирина Андреевна Тарасенко

доктор геолого-минералогических наук
старший научный сотрудник, директор
Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия
профессор
Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия
tarasenko_irina@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0002-4612-0708>

Аннотация. На основе анализа содержания элементов-примесей в более чем 5000 пробах угля из месторождений и бассейнов Сибири и российского Дальнего Востока, а также на основе опубликованных материалов выполнен обзор металлоносности углей азиатской части России. Угли региона характеризуются высоким редкометалльным потенциалом. Выявлены многочисленные различные по составу и природе редкометалльно-угольные месторождения и проявления. Экономическое значение в качестве промышленного сырья в настоящее время имеют только германиеносные угли. Потенциально перспективны для комплексного освоения угольные месторождения, обогащенные Sc, REE, Nb, Ga, Li, Au и другими редкими и благородными металлами. Распространенные на всей территории

региона уран-угольные проявления и месторождения экономического значения в настоящее время не имеют, но представляют экологическую опасность при использовании этих углей в топливно-энергетическом комплексе.

Ключевые слова: уголь, редкие элементы, металлоносность, комплексные месторождения, Сибирь, Дальний Восток

Для цитирования: Арбузов С.И., Чекрызов И.Ю., Тарасенко И.А. Редкометалльный потенциал углей Сибири и Дальнего Востока России и перспективы его освоения // Вестн. ДВО РАН. 2023. № 5. С. 31–51. http://dx.doi.org/10.37102/0869-7698_2023_231_05_3.

Original article

Rare-metal potential of Siberian and Russian Far East coals and prospects for their development

S.I. Arbutov, I.Yu. Chekryzhov, I.A. Tarasenko

Sergey I. Arbutov

Doctor of Sciences in Geology and Mineralogy

Senior Researcher, Deputy Director

Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

Professor

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

siarbutov@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0001-6378-4103>

Igor Yu. Chekryzhov

Researcher

Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

chekr2004@mail.ru,

<http://orcid.org/0000-0002-0319-8759>

Irina A. Tarasenko

Doctor of Sciences in Geology and Mineralogy

Senior Researcher, Director

Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

Professor

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

tarasenko_irina@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0002-4612-0708>

Abstract. A review of the metal content in coals of the Asian part of Russia was carried out based on the analysis of impurity elements in more than 5000 coal samples from deposits and basins of Siberia and the Russian Far East, as well as on the published sources. Coals of the region are characterized by high rare-metal potential. Many different in composition and nature rare-metal coal deposits and occurrences were found. At present, only germanium-bearing coals are of economic importance as industrial raw materials. Coal deposits enriched in Sc, REE, Nb, Ga, Li, Au, and other rare and noble metals are potentially promising for complex development. Uranium-coal occurrences and deposits spread throughout the region currently have

no economic value, but represent an environmental hazard when these coals are used in the fuel-energy complex.

Keywords: coal, rare elements, metal bearing, complex deposits, Siberia, Far East

For citation: Arbuzov S.I., Chekryzhov I.Yu., Tarasenko I.A. Rare-metal potential of Siberian and Russian Far East coals and prospects for their development. *Vestnik of the FEB RAS*. 2023;(5):31-51. (In Russ.). http://dx.doi.org/10.37102/0869-7698_2023_231_05_3.

Введение

Уголь – традиционный и один из главных энергетических ресурсов человечества. Общемировая тенденция рационального использования природных ресурсов обусловила стремление к комплексному освоению не только рудных месторождений, но и месторождений топливно-энергетического сырья. В настоящее время месторождения металлоносных углей, содержащих редкие и благородные металлы (Ge, Au, Ga, Li, Nb, Sc, РЗЭ и др.), могут быть их важным сырьевым источником дополнительно к традиционным типам месторождений этих металлов [1–17 и др.]. Основным промышленным источником германия на мировом рынке сырья по-прежнему остаются германиеносные угли, в которых помимо Ge установлены аномально высокие содержания РЗЭ, Sb, W, Mo, Rb, Cs и других элементов-примесей [4, 18, 19, 20]. В углях также сконцентрированы значительные ресурсы урана [10, 21, 22].

Угольные месторождения Сибири с начала XX в. рассматриваются как потенциальный источник благородных и редких металлов [23, 24]. За истекшее столетие в Сибири и на Дальнем Востоке России открыто немало месторождений угля с аномально высокими, а в ряде случаев и с промышленно значимыми содержаниями Ge, Sc, Au, РЗЭ, Nb, Ta, W, Mo и других ценных металлов. Природа этих аномалий различна. По предложенной В.В. Серединым классификации редкометалльных углей [2, 4] выделяются четыре генетических типа: терригенный, туфовый, инфильтрационный и эксфильтрационный. *Терригенный* тип обусловлен привнесом металлов в торфяную залежь поверхностными водами в кластической и коллоидной формах. *Вулканогенный (туфогенный, туфовый)* тип формируется за счет выпадения на поверхность палеоторфяника вулканогенного пеплового материала кислого или щелочного состава с последующим его захоронением. Пепел, обогащенный группой редких элементов, формирует аномалии соответствующего состава в углях. С ним связывают проявления Nb, Ta, РЗЭ, Zr, Hf, Ga и других литофильных металлов. *Инфильтрационный* тип связан с поступлением в палеоторфяник или угольный пласт вод зоны гипергенеза, обогащенных ценными элементами. Такой процесс весьма характерен для уран-угольных месторождений. *Эксфильтрационный* тип обусловлен поступлением и разгрузкой глубинных, в том числе термальных, вод, обогащенных ценными элементами, в торфяную залежь или угольный пласт. Этот тип рудообразования, по мнению автора классификации, типичен для формирования богатых германий-угольных месторождений с сопутствующими РЗЭ, Au, Pt, Sb, As, Hg, W и другими элементами в зависимости от состава рудообразующих растворов.

Металлоносные угли Сибири и Дальнего Востока

В настоящее время наибольший интерес в качестве потенциального сырья для основного или попутного получения редких элементов из углей представляют Ge, PЗЭ (Sc, Y и лантаноиды), Li, Ga, Nb, благородные металлы (Au, Ag и платиноиды) и, возможно, U. В углях они могут как образовывать монометалльные руды, так и формировать поликомпонентное оруденение с включением в ассоциацию не только перечисленных элементов, но и других ценных металлов (рис. 1).

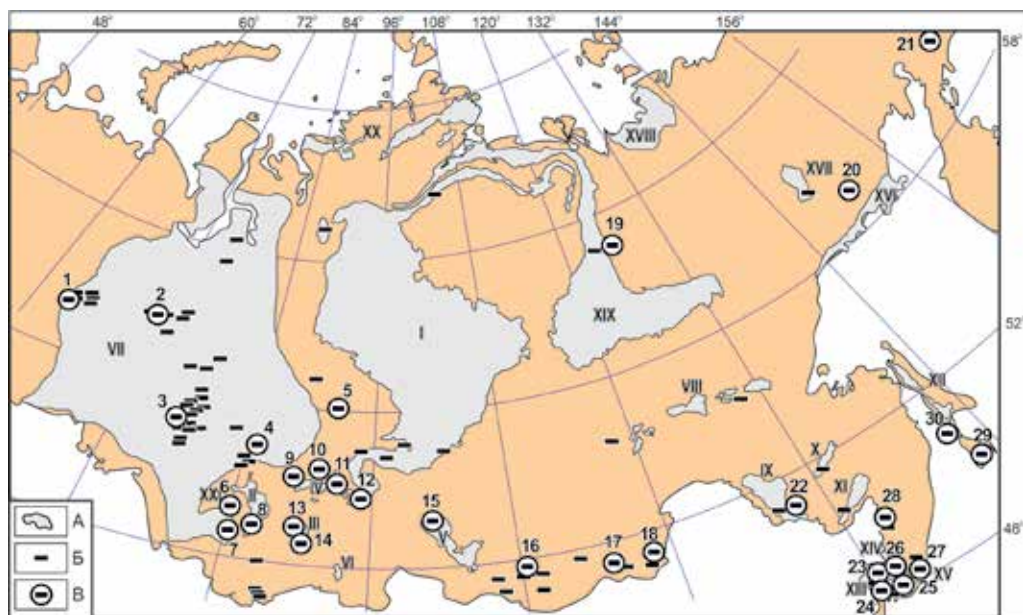


Рис. 1. Карта металлоносных угольных месторождений Сибири и Дальнего Востока России: А – угольные бассейны (I – Тунгусский, II – Кузнецкий, III – Минусинский, IV – Канско-Ачинский, V – Иркутский, VI – Улугхемский, VII – Западно-Сибирский, VIII – Южно-Якутский, IX – Нижнезейский, X – Буреинский, XI – Средне-Амурский, XII – Сахалинский, XIII – Раздольненский, XIV – Бикино-Уссурийский, XV – Партизанский, XVI – Охотский, XVII – Аркагалинский, XVIII – Яно-Омолойский, XIX – Ленский, XX – Таймырский, XXI – Горловский); Б – угольные месторождения; В – металлоносные угольные месторождения (1 – Яхлинское (Sc, Au, PЗЭ, Zr, Hf), 2 – Ловинское (Sc, Au, PЗЭ, Zr, Hf), 3 – Северо-Калиновое (Sc, Au, PЗЭ), 4 – Яйское (U), 5 – Серчанское (Ge), 6 – Бачатское (Au), 7 – поле ш. Ульяновская и ш. Казанковская (Ge), 8 – Ольжерасское (Nb, Та, PЗЭ, Zr), 9 – Сереульское (Sc), 10 – Березовское, Итатское, Козульское (U), 11 – Переяславское (Au), 12 – Саяно-Партизанское (Sc, Au, PЗЭ), 13 – Черногорское (Ge, Sc, Au), 14 – Изыхское (Nb, Та, PЗЭ, Zr, Ga), 15 – Азейское (Sc, PЗЭ), 16 – Тарбагатайское (Ge), 17 – Харанорское (U), 18 – Уртуйское (U), 19 – Жиганское (Sc, PЗЭ), 20 – Вилюнское (Sc), 21 – Эчваямское (Sc), 22 – Райчихинское (Au), 23 – Павловское (Ge, PЗЭ, U, W, Be, Sb), 24 – Раковское (U, Ge, PЗЭ), 25 – Шкотовское (Ge), 26 – Реттиховское (Ge, PЗЭ), 27 – Ванчинское (PЗЭ, Ge), 28 – Нижнебикинское (Ge), 29 – Новиковское (Ge), 30 – Солнцевское (Sc)

Германий. Германиеносность углей Сибири и Дальнего Востока России изучена значительно лучше, чем других редких элементов-примесей. Оценка германиеносности с середины прошлого века и с разной степенью детальности выполнена для подавляющего числа месторождений и бассейнов региона. Промышленно германиеносные энергетические угли выявлены в Приморском крае (Павловское

(участок Спецугли), Бикинское и Шкотовское месторождения), на о-ве Сахалин (Новиковское месторождение), в Забайкальском крае (Тарбагатайское месторождение) и в Красноярском крае (Касская площадь, Серчанское месторождение) (рис. 1). Наиболее крупные запасы металла промышленных категорий установлены в двух месторождениях коксующихся углей Кузбасса [25]. Аномально германиеносны также комплексное Раковское уран-германий-угольное месторождение и Лузановский участок Павловского бурогоугольного месторождения. Помимо Ge в германиеносных углях установлены высокие содержания Sb, W, Be, Cs, As, Hg и других элементов-примесей.

Предполагалось, что руды сформировались из металлоносных низкотемпературных растворов в период торфонакопления и диагенеза осадков [2, 26] либо из вод зоны гипергенеза в результате выветривания металлоносных пород в обрамлении угленосных впадин [18, 27, 28]. Обоснованный во всех случаях водный механизм накопления аномальных концентраций Ge в углях не вызывает дискуссий. Разночтения только в источнике германиеносных растворов и их температуре. Наиболее популярной после известных работ Ю.П. Костина и Е.С. Мейтова [26] стала гидротермальная гипотеза образования германий-угольных месторождений. Однако во многих случаях следов гидротермальной деятельности, синхронной с угленакоплением или более поздней наложенной, ни на месторождениях германиеносных углей, ни в районах их размещения не выявлено. В новых исследованиях, базирующихся на представительных современных аналитических данных, обоснована гипергенная природа германий-угольного месторождения Спецугли [18, 29]. Гипергенная природа оруденения доказана комплексом геолого-геохимических, в том числе изотопных, данных, и отчетливой связью оруденения с корой выветривания по редкометалльным грейзенизированным гранитам (рис. 2).

Промышленная обработка германиеносных углей в настоящее время ведется только на Павловском месторождении (участок Спецугли) в Приморье. Подготовлены к обработке и временно законсервированы германиеносные участки Тарбагатайского месторождения в Забайкалье [30]. Прекращена обработка Новиковского германиевого месторождения, хотя ресурсный потенциал этого месторождения еще не исчерпан [31]. Ведутся подготовительные работы на Касской площади в Красноярском крае. Запасы германия, оцененные на одном из участков (Серчанское месторождение), составляют 1112 т [32].

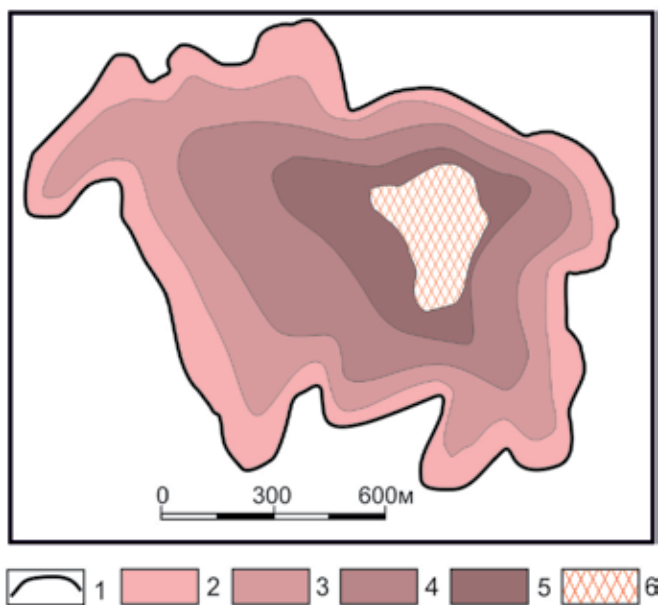


Рис. 2. Схема распределения германия в месторождении Спецугли. Условные обозначения: 1 – контур промышленного оруденения с содержанием Ge в углях (г/т): 2 – >50; 3 – >200; 4 – >400; 5 – >1000; 6 – выход фундамента

При этом общие ресурсы германия в пределах только Нижне-Касского участка Касской площади превышают 11 тыс. т [33]. Освоение высокогерманиеносных лигнитов восточной окраины Западно-Сибирского бассейна ограничивается удаленностью объектов обработки, суровыми климатическими условиями, сезонным характером добычи, обогащения и транспортировки. Однако даже в этих условиях, по мнению красноярских специалистов, возможно рентабельное получение металла [33]. В настоящее время это самое крупное германиевое месторождение мира.

Получение германия из энергетических каменных углей марки Д Минусинского бассейна ограничено низким содержанием металла. Ресурсов германия достаточно для создания оптимального по мощности производства, но невысокие концентрации металла не позволяют обеспечить рентабельность производства, ориентируясь только на германий [7].

В Кузбассе также учтены большие запасы коксующихся углей с промышленным содержанием германия [25]. Получение германия из них сдерживается отсутствием встроенной в основной технологический процесс коксования адаптированной для конкретных углей технологии его извлечения. Технология, используемая для извлечения металла из донецких углей, в применении к углям Кузбасса требует доработки [25].

Таким образом, Россия обладает крупными запасами германия в германий-угольных месторождениях и способна обеспечить как собственные потребности, так и мировой спрос на этот металл.

Скандий относится к числу рассеянных редких металлов, в связи с чем его собственные месторождения весьма немногочисленны. Скандий – один из наиболее перспективных элементов для рентабельного извлечения из углей Сибири и Дальнего Востока России. В пределах рассматриваемого региона сосредоточены значительные ресурсы скандиеносных углей, главным образом на территории Западно-Сибирской плиты (рис. 1) [34]. Максимальное содержание скандия в золе угля Западно-Сибирского бассейна достигает 0,23 %. Наиболее обогащены зола углей в западной части бассейна вблизи Урала [35]. Высокой скандиеносностью отличаются также угли Черногорского (Минусинский бассейн) и Азейского (Иркутский бассейн) месторождений [7, 34–36]. Отдельные угольные пласты, обогащенные Sc (80–400 г/т золы), отмечены в Канско-Ачинском бассейне (Бородинское, Саяно-Партизанское, Сереульское и другие месторождения). Прогнозные ресурсы его велики и превышают мировое производство на несколько порядков. Только в Черногорском месторождении сконцентрировано 13 800 т скандия, в Бородинском – 3800 т, в Саяно-Партизанском – 2600 т, в Азейском – 1911 т [8, 36].

Аномально скандиеносные угли установлены на о-ве Сахалин, в Приморье (Бикинское месторождение), в Камчатском крае (Эчвяямское месторождение) и Магаданской области (Вилигинское месторождение) [19, 34].

Уникальные концентрации скандия отмечены в углях Жиганского месторождения Ленского бассейна: до 220 г/т при среднем содержании в угольных пластах 150 г/т [37]. Эти данные требуют дополнительной проверки. При условии их подтверждения в настоящее время это наиболее обогащенные скандием угли мира.

Природа аномальных концентраций скандия определена как гидрогенная [38]. Во всех случаях источником металла являются продукты разрушения обогащенных им пород, преимущественно базитового состава. В связи с этим потенциально

скандиеносны угли, в области питания бассейна утленакопления которых распространены базальтоиды или интрузивные породы габбро-диабазовой формации.

Несмотря на достаточно высокие содержания скандия в золе угля, наличие эффективных технологий его извлечения, значительные ресурсы металла в углях, превышающие мировое потребление на несколько порядков, его запасы не учтены государственным балансом. Производства скандия из угля в связи с крайне низким спросом на металл в ближайшей перспективе не ожидается.

Лантаноиды и иттрий. Неудовлетворительное состояние минерально-сырьевой базы редкоземельных элементов (РЗЭ) в России и других странах мира определяет актуальность задачи поисков и освоения их новых источников. Основными требованиями к любым таким объектам являются: возможность их быстрого вовлечения в эксплуатацию, что прежде всего определяется наличием хорошо развитой инфраструктуры; специфический индивидуальный состав РЗЭ, характеризующийся высокой долей особенно дефицитных сейчас некоторых лантаноидов и иттрия; наличие простых технологических схем их извлечения.

Масштабная редкоземельная минерализация в угольных месторождениях, выявленная впервые более 30 лет назад в одной из впадин Приморья [1], а затем обнаруженная и в ряде других угленосных структур России и зарубежных стран [3, 5–7, 11, 39–42 и др.], во многом соответствует вышеуказанным требованиям. Полученные результаты исследований свидетельствуют, что угольные месторождения могут рассматриваться как перспективный источник редкоземельных металлов.

По В.В. Середину [2, 5], в угольных бассейнах развита РЗЭ-минерализация четырех главных генетических типов: терригенная, туфогенная, инфильтрационная и эксфильтрационная (гидротермальная). Терригенные и туфогенные аномалии РЗЭ формируются исключительно на стадии торфонакопления, а гидрогенная минерализация может формироваться на любых стадиях развития впадин. Результаты наших последних исследований [18, 42] показали, что роль гидротермальной составляющей в формировании металлоносных углей в ряде случаев была сильно преувеличена и при этом недооценена роль классических кор выветривания по редкометалльным гранитам и рудам, а также поверхностных и грунтовых вод как источников РЗЭ в углях.

Ранее установлено, что угли Сибири и Дальнего Востока России характеризуются повышенными по сравнению с угольным кларком содержаниями РЗЭ [43]. Отсутствие опыта промышленного извлечения РЗЭ из углей не позволяет дать объективную оценку их минимально промышленных содержаний. Предложено за такую величину принять сумму РЗЭ (лантаноиды + Y) в золе угля $\geq 0,1$ % [5]. Именно такие угли могут считаться металлоносными в отношении РЗЭ, они и описаны ниже.

Промышленный интерес представляют угли, обогащенные РЗЭ по всей мощности или хотя бы в значительной части угольного пласта, поскольку локальные аномалии РЗЭ в углях нередки. Например, локальные аномалии РЗЭ описаны в Павловском (Чихезском) месторождении еще в 1963 г. [44], также в Черногорском месторождении Минусинского бассейна в 1972 г. При исследовании германиеносных углей в отдельных пробах золы угля были отмечены аномальные содержания La до 0,5 % и Yb 0,01 % [45]. В Азейском месторождении Иркутского бассейна установлены локальные аномалии с содержанием суммы РЗЭ в золе угля до 0,26 %. Они связаны с наличием в углях синхронного древнему

торфонакоплению вулканогенного пеплового материала кислого (риолитового) состава [36]. В Кузбассе наиболее обогащены Nb, Ta, Zr, Hf и лантаноидами угли пласта XI кемеровской свиты на юге бассейна [6, 42]. Здесь установлены угли с содержанием в золе РЗЭ более 0,1 %. Генетически редкоземельная минерализация представлена туфогенным (туфовым) типом и обусловлена выносом РЗЭ из специфических межугольных прослоев – тонштейнов, продуктов изменения вулканогенной пирокластики щелочного состава.

Имеется информация об очень высоких содержаниях РЗЭ в углях Жиганского бурогоугольного месторождения мезозойского возраста [37]. Однако позднее контрольные анализы проб, проведенные в ИГЕМ РАН, показали, что результаты были в 10 и более раз завышены [2].

Аномально обогащены РЗЭ угли Южно-Якутского бассейна [46].

В Приморье, наиболее изученном относительно РЗЭ-углей регионе, ранее описаны четыре бурогоугольных месторождения (Ванчинское, Павловское, Раковское и Ретиховское), где в угольных пластах зафиксированы аномальные содержания РЗЭ (сумма лантаноиды + Y \geq 0,1 %) [1, 2, 5, 41, 47]. В описываемых проявлениях прослежено распространение минерализации по нескольким сечениям, а также получены предварительные данные по формам нахождения и распределению РЗЭ в углях. В угольных месторождениях Приморья развита РЗЭ-минерализация трех главных генетических типов: гидрогенная (экс- и инфильтрационная) минерализация локализуется исключительно в угольных пластах, а туфогенная и терригенная – как в углях, так и во вмещающих породах [5].

Ванчинское проявление РЗЭ находится в Ольгинском районе Приморского края. Угленосные отложения эоцен-олигоценового возраста выполняют кайнозойскую Ванчинскую впадину. Здесь впервые в мировой практике были описаны угли с содержанием РЗЭ, близким к промышленным [1]. Концентрации РЗЭ в обогащенных ими углях варьируют от 250 до 750 г/т, в золах – от 0,1 до 0,3 %. Содержание Y в золе колеблется от 280 до 1448 г/т или от 22 до 58 % от суммы РЗЭ. Данная минерализация в углях проявления относится к туфогенному генетическому типу [47].

Павловское проявление находится в Михайловском районе в олигоценовых угленосных отложениях павловской свиты, выполняющих кайнозойский чехол одноименной впадины. Максимальные концентрации РЗЭ (до 316 г/т угля и до 1215 г/т зола) на участке Спецугли фиксируются в самом верхнем пласте Шн. Также высокие содержания РЗЭ отмечены на участках Лузановский и Восточный. Если учесть концентрации не определенных в данных углях лантаноидов (Pr, Gd, Dy, Ho, Er, Tm), то суммарные содержания РЗЭ в максимально обогащенных участках достигают примерно 400 г/т угля или 0,15 % в золе угля. РЗЭ-минерализация в углях Павловского проявления относилась В.В. Серединым к эксфильтрационному генетическому подтипу гидрогенного типа [5]. Результаты наших последних исследований указывают на преимущественно инфильтрационную природу накопления РЗЭ в углях участка Спецугли. РЗЭ поступали в угольные пласты из коры выветривания гранитов [18].

Раковское проявление находится в Михайловском районе в олигоценовых угленосных отложениях павловской свиты, формирующих кайнозойский чехол одноименной впадины. Средние содержания РЗЭ в золах углей Раковского месторождения, рассчитанные с учетом не определенных лантаноидов и иттрия, составляют для разных сечений от 0,14 до 0,22 %. Наиболее выдержаны содержания

РЗЭ, которые накапливались в углях при поступлении в угольный бассейн терригенной взвеси с высокими концентрациями этих металлов. Их источником служили многочисленные рудопроявления РЗЭ в выветрелых гранитах и рвущих их дайках, выявленных недавно в северо-восточном борту Раковской впадины. РЗЭ-минерализация ранее относилась к терригенному типу [5], по результатам последних исследований установлено ее смешанное инфильтрационно-кластогенное происхождение [41, 48].

Реттиховское проявление находится в Черниговском районе в олигоценовых угленосных отложениях павловской свиты. Содержание РЗЭ в золах углей пласта 3 Восточной мульды Реттиховского месторождения достигает 0,5 %. РЗЭ-минерализация в углях проявления относится к гидрогенному типу, эксфильтрационному подтипу [5].

На графиках распределения РЗЭ в металлоносных (редкоземельных) углях Приморья (рис. 3) видны четкий европиевый минимум и преобладание группы средних и тяжелых РЗЭ над легкими. Похожие спектры имеют граниты, слагающие фундамент и обрамление Павловской, Раковской и Реттиховской впадин, а также щелочные туфы, распространенные в угленосных отложениях Ванчинской впадины.

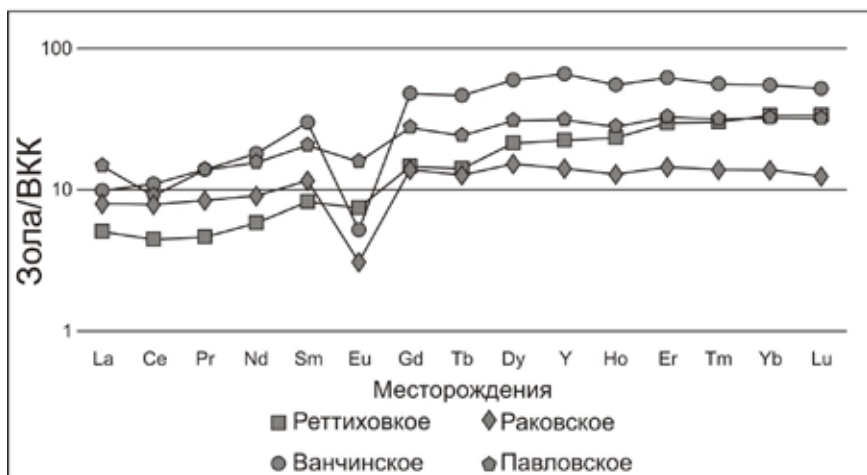


Рис. 3. Нормированные на состав верхней континентальной коры (ВКК) [49] графики распределения РЗЭ в металлоносных углях бурогоугольных месторождений Приморья

Как было отмечено ранее [5, 41], РЗЭ-минерализация в угленосных структурах имеет полигенную природу и может развиваться как в угольных пластах, так и в углевмещающих отложениях, а также в породах фундамента. Это открывает пути для попутного получения РЗЭ не только из отходов сжигания твердого топлива, но и при вскрышных работах и даже после отработки запасов углей, что имеет важное экономическое и социальное значение для горнодобывающих районов.

Несмотря на отсутствие опыта промышленного получения РЗЭ из углей и золошлаков, перспективы вовлечения этого ресурса в промышленное производство в связи с высоким спросом на них достаточно велики. Разработаны в лабораторных условиях разнообразные технологии извлечения редкоземельных элементов из золы углей. В связи с невозможностью получения богатого концентрата из угля или золы угля необходимо вскрытие всей массы золы. Рассмотрены варианты

серноокислотной, азотнокислой и фтористоводородной технологии вскрытия золошлаков и перевода РЗЭ в раствор. Каждая из предложенных технологий жизнеспособна, но неблагоприятная конъюнктура рынка редких земель не позволяет в настоящее время внедрить их с целью переработки золошлаков с получением РЗЭ-концентратов. Не перерабатываются даже богатые руды крупных коренных месторождений редких земель (Томтор, Чуктуконское и др.), так как по себестоимости их добычи и переработки они не могут пока соперничать с «ионными» рудами Китая.

Уран. Различные по масштабу уран-угольные месторождения и проявления повсеместно распространены в Сибири и на Дальнем Востоке России. Крупных уран-угольных месторождений в регионе не выявлено. Наиболее богатые месторождения с промышленными запасами урана известны на территории соседнего Казахстана – Нижнеилийское и Кольджат с запасами 35 тыс. и 28 тыс. т U_3O_8 соответственно [21, 22]. В обоих случаях это комплексные молибден-урановые руды. В качестве ценных примесей присутствует также Re, Ge, Ag, Co, Se, Y.

Накопление урана в угольных пластах возможно в сингенезе в процессе формирования палеоторфяников под влиянием ураноносных вод [50] либо происходит из грунтовых вод в результате эпигенетического рудоотложения инфильтрационного типа [51]. Для формирования таких месторождений наиболее благоприятны условия аридного климата в связи с повышенным содержанием U в водах этой климатической зоны [52]. Однако уран накапливается и в типичных гумидных обстановках. Примером могут служить мелкие месторождения уран-угольного типа в Томской области (Усманское, Яйское и др.).

Месторождения уран-угольного типа на территории Сибири и Дальнего Востока промышленного значения пока не имеют в связи с небольшими запасами отдельных месторождений, низким содержанием урана в рудах, малой рентабельностью технологии и экологическими проблемами, связанными с переработкой руд. Однако суммарные ресурсы таких руд достаточно велики. В одном только Канско-Ачинском бассейне запасы сажистых ураноносных углей превышают 87 млн т [53]. При среднем содержании в них урана 0,023 % его ресурсы превышают 20 тыс. т. Велики ресурсы урана в Западно-Сибирском и Иркутском бассейнах и еще более значительны в углях Забайкалья и Приморского края. Отдельные месторождения (Уртуйское в Забайкалье, Раковское в Приморье и др.) оценивались, но были признаны неперспективными из-за небольших запасов и сложности технологии освоения.

Аномальные концентрации урана установлены преимущественно в окисленных бурых углях. При этом процессы грунтового окисления при благоприятной гидрогеохимической обстановке в отдельных случаях приводят к формированию радиоактивных аномалий и в каменных углях. Чаще всего существенно обогащены ураном (до 0,04 %) лишь локальные участки выхода пласта под наносы с отчетливо проявленным гипергенным окислением, где угли приобретают сажистый облик. Нередко признаком наложенного гипергенного изменения является нарушение радиоактивного равновесия, что указывает на молодой (не более 1,7 млн лет) возраст оруденения. Такие аномалии установлены на юге Тунгусского и в Минусинском бассейне [54]. На глубоких горизонтах разреза, даже при наличии песчаников или гравелитов в кровле пласта, существенного обогащения углей ураном не отмечено (рис. 4). Торий в процессе гипергенного окисления угля не накапливается.

Промышленная добыча урана из углей велась в начале ядерной эры, когда США добыли из углей более 1000 т металла [55, 56]. Несколько меньшее количество этого металла извлекли из углей СССР, ГДР, КНР и КНДР. В настоящее время перспективы промышленного освоения уранового оруденения в углях могут быть связаны только с решением вопроса об утилизации таких экологически опасных отложений. Особенно это актуально в связи с необходимостью обезвреживания накопленных ранее золоотвалов ТЭС, сжигавших ураноносные угли [10, 55]. Имеются сведения о проведении таких исследований на трех угольных электростанциях КНР с разработкой соответствующих технологий и с планируемым получением более 150 т U в год [55].

Комплексное *Ta-Nb-Zr-Hf-PЗЭ-Ga оруденение* в углях рассматриваемого региона впервые было установлено в 1989 г. В.В. Ершовым [6] и частично описано В.В. Серединым [57]. Оно связано с проявлением субсинхронного угленакоплением кислого щелочного вулканизма [42]. В настоящее время все проявления и месторождения подобного состава, выявленные в регионе, а также в КНР, связаны с щелочным магматизмом. Аналогичные руды обнаружены в Минусинском бассейне [7, 58]. Оруденение формируется в угольном пласте на границе горизонта измененного вулканического пепла и угля (рис. 5). При этом более миграционно способные элементы образуют более обширный ореол. Слабоподвижные в условиях зоны гипергенеза элементы, такие как тантал, образуют максимальные концентрации непосредственно в вулканогенных прослоях.

Руды хорошо выявляются по радиоактивным аномалиям преимущественно ториевой природы, подчеркивающим кислый щелочной состав исходного вулканогенного вещества. О том, что это не прибрежные россыпи, свидетельствуют площадной характер горизонтов, облик кластогенного материала и наличие значительного количества реликтового вулканогенного вещества [42]. Такие аномалии, но небольшого масштаба из-за малой мощности пепловых горизонтов (тонштейнов), широко распространены на всей территории Сибири и Дальнего Востока. Например, в зоне влияния тонштейна в пласте II Азейского месторождения Иркутского бассейна установлено до 1250 г/т Nb, 169 г/т Ta, 0,35 % Zr, 950 г/т Y,

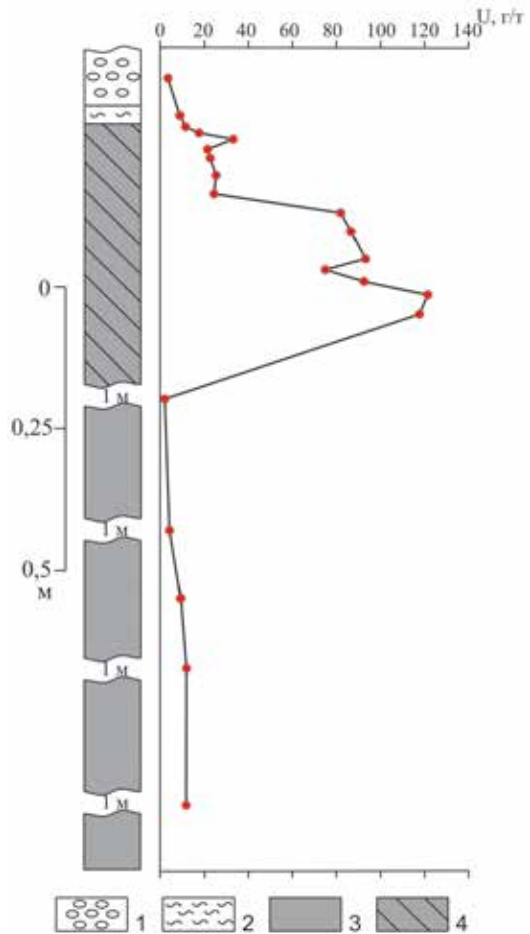


Рис. 4. Распределение урана в разрезе пласта Итатский Итатского месторождения Канско-Ачинского бассейна. Условные обозначения: 1 – конгломераты, 2 – аргиллит, 3 – уголь; 4 – уголь окисленный

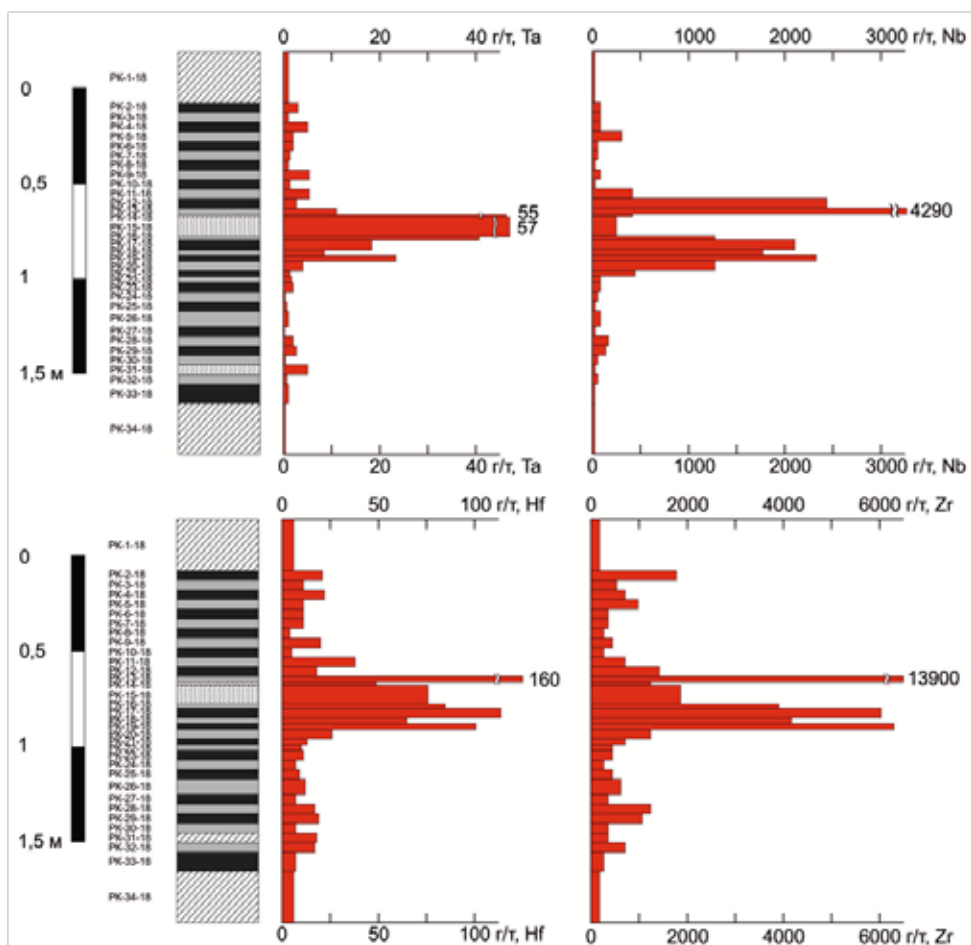


Рис. 5. Распределение Ta, Nb, Hf и Zr в разрезе пласта XI Ольжерасского месторождения [42]

0,25 % суммы лантаноидов, 344 г/т Sn, 156 г/т Ga, 540 г/т Th и 167 г/т U. Несмотря на существенное отличие в возрасте от пласта XI в Кузбассе, спектры элементов очень близки между собой, хотя и спектр пласта II Азейского месторождения имеет свою специфику, обусловленную различием исходной вулканогенной пирокластики.

Перспективы промышленного освоения такого типа оруденения неопределены. Ресурсы их, как правило, недостаточны для организации крупного производства, а комплексный полиэлементный состав руд требует организации сложного технологического цикла.

Золото. Золотоносность углей – один из наиболее сложных и дискуссионных вопросов оценки металлоносности угольных месторождений. Месторождений с промышленным содержанием золота в углях Сибири и Дальнего Востока России не выявлено. Вместе с тем опубликовано множество данных об аномальных его содержаниях в различных угольных месторождениях Сибири: в Кузбассе, Минусинском бассейне, Переясловском, Латынцевском и Саяно-Партизанском месторождениях Канско-Ачинского бассейна [6–9]. Наиболее значительные содержания (до 7 г/т в золе угля) установлены в Западно-Сибирском бассейне [59].

Сведения о содержании золота в углях Дальневосточного региона еще более представительны. Коллективом специалистов из Амурского центра ДВО РАН опубликованы данные об уникальных концентрациях золота в углях Дальнего Востока [60]. Здесь же отмечалась и аномальная концентрация платины [61]. Цифры, безусловно, впечатляющие, но, к сожалению, никакими другими данными они не подтверждаются, в связи с чем подвергаются критическому анализу [62]. Проведенное в 2010 и 2021 гг. ревизионное бороздвое опробование углей и углевмещающих пород Ерковецкого (62 пробы), Райчихинского (62 пробы) и Харанорского (68 проб) месторождений и анализ содержания Au методом ИНАА как непосредственно в угле, так и в золе угля показали, что содержание золота фоновое в угле Ерковецкого и Харанорского месторождений, но повышенное в Райчихинском месторождении (10–60 мг/т, в единичных пробах до 0,302 г/т в угле и до 5,5 г/т в золе угля). Последнее подтверждается и данными анализа единичных проб углепродукции, в золе которой установлено в среднем 1,2 г/т Au [63]. Даже если приводимые автором данные для 7 месторождений завышены, угли Райчихинского месторождения резко выделяются повышенным в 2–6 раз содержанием золота на фоне других месторождений. Существенно превышающие кларковые значения содержания Au (от 0,005 до 0,5 г/т), Pt, Pd и Ag установлены в золе угля Бикинского месторождения [64]. На потенциальную золотоносность углей Дальневосточного региона указывают и результаты изучения золошлаков ТЭС в регионе [63, 64]. По данным А.А. Черепанова [63], в золошлаках ТЭЦ Приморского и Хабаровского краев содержание золота достигает 2 г/т и более при средних 0,8–1,5 г/т. По более поздним сведениям, концентрация золота в золошлаках ТЭЦ г. Хабаровск в рядовых пробах колеблется от следов до 25 г/т при среднем значении 0,07 г/т [65]. Все эти данные указывают на высокий благороднометалльный потенциал углей Дальневосточного региона.

Перспективы извлечения золота из углей региона оценены слабо. Опыт таких работ имеется. В конце прошлого века извлечение золота в полупромышленных масштабах велось на Рефтинской ГРЭС в Свердловской области [66]. Наиболее реально в современных условиях промышленное извлечение золота из золошлаков ТЭС. Накоплены достаточно большие количества таких отходов и ежегодно происходит пополнение их запасов. Специфика состава и свойств золошлаков требует разработки специальной технологии их переработки. Небольшой объем исследований, выполненный А.М. Сазоновым с коллегами [67], показал, что из золошлаковых отходов от сжигания бурых углей основных промышленных месторождений Канско-Ачинского бассейна гравитационными методами оно почти не извлекается [67]. Вместе с тем, судя по содержанию золота в лабораторной золе угля, оно может попутно извлекаться из отходов сжигания углей Саяно-Партизанского, Бородинского, Переясловского и Большесырского месторождений. Особого внимания заслуживает Переясловское месторождение. По предварительным данным суммарные прогнозные ресурсы золота в месторождении достигают 196 т [9]. Только в поле разреза Переясловский в углях с балансовыми запасами промышленных категорий сосредоточено свыше 22 т золота.

Для отдельных золошлакоотвалов Дальневосточного региона выполнена серия лабораторных и полупромышленных технологических испытаний. Предложена технологическая схема с получением концентрата благородных металлов, магнитной фракции, сажи и строительных материалов [65]. Предложенная схема весьма привлекательна для реализации, так как позволяет не только получить

благородные металлы и другое сырье, но и освободить задействованные под золотвалы территории. Таким образом, анализ показал, что золото – один из наиболее перспективных металлов для промышленного извлечения из углей в регионе.

Литий. Высокий спрос на литий как металл для современных аккумуляторов («батареиный» элемент) обуславливает повышенный интерес ко всем потенциальным его источникам, в том числе и к редкометалльно-угольным месторождениям. В начале века в Китае выявили несколько угольных месторождений, богатых литием [13, 15, 16]. При относительно невысоких содержаниях – 264 г/т в угле и 1320 г/т в золе угля – организована промышленная переработка золошлаков. Литий и галлий получают на промышленных установках из золы угля на севере Китая [17, 68].

Литиеносность углей Сибири и Дальнего Востока России изучена слабо. Потенциал для выявления подобного типа месторождений имеется, однако ограниченные возможности для количественного определения Li в углях в период их массового исследования не позволяют выполнить корректную оценку литиеносности углей региона. Имеются отдельные факты наличия аномальных его концентраций в углях Минусинского бассейна [7]. В пласте 19 установлено в среднем 100 г/т Li. В пересчете на золу это 760 г/т. В Синегорском месторождении Приморского края выявлено до 120 г/т Li в угле и до 400 г/т в золе угля. Аномально повышено содержание Li в углях Мачинского месторождения Сахалинского бассейна (до 81 г/т в угле и до 286 г/т в золе угля). В товарной продукции ныне не действующих шахт им. Димитрова и им. Орджоникидзе Араличевского района Кузбасса среднее содержание лития 53 и 106 г/т, что в пересчете на золу дает 250 и 390 г/т соответственно [69]. Аномальная литиеносность отмечена и для углей других месторождений юга Кузнецкого бассейна.

На Павловском месторождении Приморского края в углях вблизи фундамента, представленного аргиллизированными гранитами вознесенского комплекса и дайками андезита, содержание лития достигает 103 г/т, а в золе угля – 150–250 г/т. Участок Павловского месторождения, известный как германий-угольное месторождение Спецугли, еще более обогащен литием [18]. Среднее содержание в угле здесь составляет 105 г/т, в пересчете на золу угля – 341 г/т. Распределение лития в разрезе неравномерно и возрастает от нижних пластов к верхним. Наиболее высокие содержания характерны для верхнего пласта III, содержащего 172 г/т (680 г/т в золе угля) лития. Эти цифры сопоставимы с теми, что установлены на промышленных Ga-Li редкометалльно-угольных месторождениях Китая [15–17, 68].

Помимо лития на месторождении аномальны содержания и других редких щелочных металлов (Rb и Cs) [18, 20, 70]. Источником редких щелочей, по-видимому, являются редкометалльные грейзенизированные граниты, выходы которых вскрыты в центре месторождения. Остаточные коры выветривания отличаются повышенным содержанием редких щелочных металлов [18].

В целом геохимия лития в углях Сибири и Дальнего Востока изучена слабо, но даже имеющаяся ограниченная информация позволяет прогнозировать высокие перспективы литиеносности углей региона.

Заключение

Таким образом, в углях Сибирского и Дальневосточного регионов установлено несколько типов редкометалльных концентраций. Из них в качестве

возможно промышленно значимых в настоящее время могут рассматриваться германиевые, скандиевые, золоторудные и Nb-Ta-Zr-Hf-Y-редкоземельные. Наиболее перспективны для освоения угли, характеризующиеся высокими уровнями накопления германия, золота и скандия. Однако для выводов о целесообразности их промышленной отработки необходимо проведение детальных технологических исследований и выполнение комплекса работ по геолого-экономической оценке перспективных объектов.

Совместное получение германия, скандия, глинозема, галлия, лантаноидов, циркония, гафния, иттрия, ниобия и золота должно обеспечить рентабельность и безотходность производства, хотя очевидно, что такие выводы должны предваряться детальными технико-экономическими проработками. Отечественного практического опыта извлечения комплекса редких элементов из углей не существует, и, следовательно, достоверная экономическая оценка углей как источника комплексного сырья в настоящее время не представляется возможной. Единственное, что можно с полной уверенностью утверждать, учитывая опыт комплексного освоения рудных объектов в цветной металлургии, – организация попутного извлечения редких металлов и других ценных компонентов во всех случаях (за единичными исключениями) должна обеспечить существенное повышение экономической эффективности разработки месторождений.

Проведенные исследования показывают, что угли Сибири и Дальнего Востока России характеризуются высоким редкометалльным потенциалом, в изучении которого имеются значительные достижения. Уже сейчас при современных технологиях на базе отдельных месторождений может быть создано рентабельное производство по извлечению этих металлов. Наиболее перспективно извлечение из углей германия, скандия, золота и комплекса литофильных редких металлов (Ta, Nb, Zr, Hf, Y, REE, Li, Ga).

Для эффективного освоения редкометалльного потенциала углей региона необходимо проведение комплексных исследований угольных месторождений и бассейнов Сибири и Дальнего Востока на основе государственной программы, для реализации которой должны быть привлечены специалисты самых разных отраслей знаний. Только при таком подходе может быть осуществлен прорыв в решении проблемы комплексного освоения угольных месторождений и получен осязаемый экономический и социальный эффект.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Середин В.В. О новом типе редкоземельной минерализации в кайнозойских угленосных бассейнах // Докл. АН СССР, 1991. Т. 320. С. 1446–1450.
2. Середин В.В. Металлоносность углей: условия формирования и перспективы освоения // Угольная база России. Т. 6. М.: Геоинформмарк, 2004. С. 453–519.
3. Seredin V.V. Rare earth element-bearing coals from the Russian Far East deposits // Int. J. Coal Geol. 1996. Vol. 30. P. 101–129.
4. Seredin V.V., Finkelman R.B. Metalliferous coals: A review of the main genetic and geochemical types // Int. J. Coal Geol. 2008. Vol. 76. P. 253–289.
5. Seredin V.V., Dai S. Coal deposits as potential alternative sources for lanthanides and yttrium // Int. J. Coal Geol. 2012. Vol. 94. P. 67–93.
6. Арбузов С.И., Ершов В.В., Поцелуев А.А., Рихванов Л.П. Редкие элементы в углях Кузнецкого бассейна. Кемерово: Кемеровский полиграфкомбинат, 2000. 246 с.
7. Арбузов С.И., Ершов В.В., Рихванов Л.П., Усова Т.Ю., Кяргин В.В., Булатов А.А., Дубовик Н.Е. Редкометалльный потенциал углей Минусинского бассейна. Новосибирск: Гео, 2003. 347 с.

8. Арбузов С.И., Ершов В.В. Геохимия редких элементов в углях Сибири. Томск: Д-Принт, 2007. 468 с.
9. Арбузов С.И., Волостнов А.В., Ершов В.В., Рихванов Л.П., Миронов В.С., Машенькин В.С. Геохимия и металлоносность углей Красноярского края. Томск: STT, 2008. 300 с.
10. Арбузов С.И., Машенькин В.С., Рыбалко В.И., Судыко А.Ф. Редкометалльный потенциал углей Северной Азии (Сибирь, российский Дальний Восток, Монголия) // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2014. № 3с, ч. 2. С. 41–44.
11. Dai S., Zhou Y., Zhang M., Wang X., Wang J., Song X., Jiang Y., Luo Y., Song Z., Yang Z., Ren D. A new type of Nb(Ta)-Zr(Hf)-REE-Ga polymetallic deposit in the late Permian coal-bearing strata, eastern Yunnan, south-western China: possible economic significance and genetic implications // *Int. J. Coal Geol.* 2010. Vol. 83. P. 55–63.
12. Dai S., Chekryzhov I.Yu., Seredin V.V., Nechaev V.P., Wang X., Ward C.R., Hower J.C., Graham I.T., Ren D. Metalliferous coal deposits in East Asia (Primorye of Russia and South China): A review of geodynamic controls and styles of mineralization // *Gondwana Res.* 2016. Vol. 29. P. 60–82.
13. Dai S., Finkelman R.B. Coal as a promising source of critical elements: Progress and future prospects // *Int. J. Coal Geol.* 2018. Vol. 186. P. 155–164.
14. Неженский И.А., Вялов В.И., Мирхалевская Н.В., Кузеванова Е.В. Геолого-экономическая оценка редкометалльной составляющей бурогольных месторождений Приморского края // *Регион. геология и металлогения.* 2014. № 59. С. 113–120.
15. Sun Y.Z., Zhao C.L., Li Y.H., Wang J.X., Liu S.M. Li distribution and mode of occurrences in Li-bearing coal seam N 6 from the Guanbanwusu Mine, Inner Mongolia, Northern China // *Energy Exploration and Exploitation.* 2012. Vol. 30 (1). P. 109–130.
16. Sun Y.Z., Zhao C.L., Li Y.H., Wang J.X., Zhang J.Y., Jin Z., Lin M.Y., Kalkreuth W. Further information of the associated Li deposits in Coal Seam 6 at Jungar Coalfield, Inner Mongolia, Northern China // *Acta Geol. Sinica.* 2013. Vol. 87, N 4. P. 801–812.
17. Qin S., Zhao C., Li Y., Zhang Y. Review of coal as a promising source of lithium // *Int. J. Oil, Gas and Coal Technol.* 2015. Vol. 9, N 2. P. 215–229.
18. Arbuzov S.I., Chekryzhov I.Yu., Spears D.A., Plenok S.S., Soktoev B.R., Popov N.Yu. Geology, geochemistry, mineralogy and genesis of the Spetsugli high-germanium coal deposit in the Pavlovsk coalfield, Russian Far East // *Ore Geol. Rev.* 2021. Vol. 139, pt B. 104537.
19. Вялов В.И., Богомолов А.Х., Шишов Е.П., Чернышев А.А. Угольные месторождения Дальнего Востока России и ресурсный потенциал содержащихся в них ценных металлов // *Георесурсы.* 2017. Спецвып., ч. 2. С. 256–262. <http://doi.org/10.18599/grs.19.25>.
20. Вялов В.И., Наставкин А.В., Шишов Е.П. Особенности распределения сопутствующих германию промышленно ценных микроэлементов в углях Павловского месторождения (участок Спецугли) // *Химия тверд. топлива.* 2021. № 1. С. 17–28.
21. Язиков В.Г. Геолого-промышленные типы урановых месторождений Казахстана // *Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: материалы II междунар. конф.* Томск: Тандем-Арт, 2004. С. 754–762.
22. Миронов Ю.Б. Типы урановых месторождений Альпийско-Гималайского пояса // *Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: материалы IV междунар. конф., 4–8 июня 2013 г., г. Томск.* Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2013. С. 367–370.
23. Кулибин К.А. Драгоценные металлы в каменном угле // *Золото и платина.* 1908. № 24. С. 510–511.
24. Шахов Ф.Н., Эфенди М.Э. К геохимии углей Кузнецкого бассейна // *Докл. АН СССР.* 1946. Т. 51. № 2. С. 135–136.
25. Кац А.Я., Кременецкий А.А., Подкопаев О.И. Германий – минерально-сырьевая база Российской Федерации // *Минеральн. ресурсы России. Экономика и управление.* 1998. № 3. С. 5–9.
26. Костин Ю.П., Мейтов Е.С. К генезису месторождений высокогерманиеносных углей и критериям их поисков // *Изв. АН СССР. Серия геол.* 1972. № 1. С. 112–119.
27. Сапрыкин Ф.Я., Богданов В.В. Методическое руководство по изучению и оценке месторождений угля на германий и другие редкие элементы. М.: Недра, 1967. 311 с.
28. Вялов В.И., Ларичев А.И., Кузеванова Е.В., Богомолов А.Х., Гамов М.И. Редкие металлы в бурогольных месторождениях Приморья и их ресурсный потенциал // *Регион. геология и металлогения.* 2012. № 51. С. 96–105.
29. Блохин М.Г., Арбузов С.И., Чекрыжов И.Ю. Исследование изотопных отношений кислорода и водорода каолинита тонштейнов, кор выветривания и аргиллизита как показателей природных

- условий его формирования // Изв. Том. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333, № 12. С. 46–60.
30. Авдеев П.Б., Кужиков А.А., Куклина Г.Л. Перспективы использования германийсодержащих углей Тарбагатайского бурогоугольного месторождения в Забайкалье // Горн. информ.-аналит. бюл. 2015. № 4. С. 26–31.
31. Вялов В.И., Наставкин А. В., Шишов Е. П. Новые данные о металлоносности углей Сахалина // Химия тверд. топлива. 2022. № 6. С. 1–5.
32. Наидко В.И., Макаров В.А., Козьмин Д.Г., Шиманский А.Ф., Фертиков А.И. Геологические и геохимические особенности германийносных лигнитов мелового возраста среднего течения Енисея // Геология и геофизика. 2019. Т. 60, № 1. С. 101–113.
33. Евдокимов А.П., Озерский А.Ю., Еханин А.Г. Германийносные лигниты юго-восточной окраины Западно-Сибирской плиты // Разведка и охрана недр. 2004. № 6. С. 26–29.
34. Arbutov S.I., Volostnov A.V., Mezhibor A.M., Rybalko V.I., Ilenok S.S. Scandium (Sc) geochemistry of coals (Siberia, Russian Far East, Mongolia, Kazakhstan, and Iran) // Int. J. Coal Geol. 2014. Vol. 125. P. 22–35.
35. Середин В.В., Арбузов С.И., Алексеев В.П. Скандиеносные угли Яхлинского месторождения, Западная Сибирь // Докл. Акад. наук. 2006. Т. 409, № 5. С. 677–682.
36. Ильенок С.С., Арбузов С.И. Металлоносные угли Азейского месторождения Иркутского угольного бассейна // Изв. Том. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329, № 8. С. 132–144.
37. Каширцев В.А., Зуева И.Н., Сукнев В.С., Митронов Д.В., Сюндюков Ш.А., Андреева Г.В., Капышева Г.И., Лившиц С.Х., Попов В.И. Парагенетические ассоциации редкоземельных элементов в мезозойских углях северной части Ленского бассейна // Отечественная геология. 1999. № 4. С. 65–68.
38. Арбузов С.И. Природа аномальных концентраций скандия в углях // Изв. Том. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2013. Т. 323, № 1. С. 56–64.
39. Dai S., Graham I.T., Ward C.R. A review of anomalous rare earth elements and yttrium in coal // Int. J. Coal. Geol. 2016. Vol. 159. P. 82–95.
40. Dai S., Graham I.T., Ward C.R. A review of anomalous rare earth elements and yttrium in coal // Int. J. Coal Geol. 2016. Vol. 159. P. 82–95.
41. Чекрызов И.Ю., Нечаев В.П., Трач Г.Н., Трач Д.А. Проявления редкоземельной минерализации в южной части Приморского края // Горный журн. 2018. № 2. С. 35–40.
42. Arbutov S.I., Spears D.A., Vergunov A.V., Ilenok S.S. Geochemistry, mineralogy and genesis of rare metal (Nb-Ta-Zr-Hf-Y-REE-Ga) coals of the seam XI in the south of Kuznetsk Basin, Russia // Ore Geol. Rev. 2019. Vol. 113. 103073.
43. Arbutov S.I., Chekryzhov I.Yu., Finkelman R.B., Sun Y.Z., Zhao C.L., Il'enok S.S., Blokhin M.G., Zarubina N.V. Comments on the geochemistry of rare-earth elements (La, Ce, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu) with examples from coals of North Asia (Siberia, Russian Far East, North China, Mongolia, and Kazakhstan) // Int. J. Coal Geol. 2019. Vol. 206. P. 106–120.
44. Костерин А.В., Королев Ф.Д., Кизюра В.Е. Редкие земли в Чихезском бурогоугольном месторождении // Геохимия. 1963. № 7. С. 594–595.
45. Горький Ю.И. Основные закономерности распространения германия в ископаемых углях (на примере Минусинского бассейна): дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Минск, 1972. 184 с.
46. Швец В.Н., Боярко Г.Ю. О промышленной ценности редких земель и германия, депонированных в основных целевых угольных пластах Южной Якутии // Геология и тектоника платформ и орогенных областей северо-востока Азии: материалы совещания. Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1999. С. 186–189.
47. Середин В.В., Чекрызов И.Ю. Рудоносность Ванчинского грабена (Приморье) // Геол. рудн. месторожд. 2011. Т. 53, № 3. С. 230–249.
48. Popov N.Yu., Chekryzhov I.Yu., Tarasenko I.A., Kasatkin S.A., Kholodov A.S. Structural and geochemical features of coal-bearing sediments and sources of rare element impurities in coals of the Rakovka depression (Primorsky Krai, Russia) // Int. J. Coal Sci. Technol. 2022. Vol. 9. 14.
49. Taylor S.R., McLennan S.M. The continental crust: its composition and evolution. Oxford: Blackwell Scientific Publication, 1985. 312 p.
50. Росляков Н.А., Калинин Ю.А., Рослякова Н.В., Анцырев А.А., Пахомов В.Г. Экзогенное концентрирование радионуклидов в торфяниках и корах выветривания Новосибирской области // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: материалы II междунар. конф. Томск, 18–22 октября 2004 г. Томск: Тандем-Арт, 2004. С. 522–526.

51. Кисляков Я.М., Щеточкин В.Н. Гидрогенное рудообразование / под ред. А.И. Кривцова, Г.А. Машковцева. М.: Геоинформмарк, 2000. 610 с.
52. Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. 2-е изд., исправл. и доп. М.: Недра, 1998. 366 с.
53. Гаврилин К.В., Озерский А.Ю. Канско-Ачинский угольный бассейн. М.: Недра, 1996. 272 с.
54. Arbuzov S.I., Volostnov A.V., Rikhvanov L.P., Mezhibor A.M., Plenok S.S. Geochemistry of radioactive elements (U, Th) in coal and peat of northern Asia (Siberia, Russian Far East, Kazakhstan, and Mongolia) // *Int. J. Coal Geol.* 2011. Vol. 86. P. 318–328.
55. Monnet A., Percebos J., Gabriel S. Assessing the potential production of uranium from coal-ash milling in the long run // *Res. Policy.* 2015. Vol. 45. P. 173–182.
56. Finkelman R.B., Arbuzov S.I. Radioactive elements in coal and their possible impacts // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: материалы VI междунар. конф. (Томск, 20–24 сентября 2021 г.): в 2 т. Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2021. Т. 1. С. 47–49.
57. Середин В.В. Первые данные об аномальных концентрациях ниобия в углях России // Докл. РАН. 1994. Т. 335, № 5. С. 634–636.
58. Вергунов А.В., Арбузов С.И., Еремеева В.В. Минералогия, геохимия и генезис редкометалльного Zr-Nb-Hf-Ta-REE-Ga оруденения в пласте XXX Минусинского бассейна // Изв. Том. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331, № 7. С. 49–62.
59. Arbuzov S.I., Rikhvanov L.P., Maslov S.G., Arhipov V.S., Belyaeva A.M. Anomalous gold contents in brown coals and peat in the south-eastern region of the Western-Siberian platform // *Int. J. Coal Geol.* 2006. Vol. 68, N 3/4. P. 127–134.
60. Сорокин А.П., Кузьминых В.М., Рождествина В.И. Золото в бурых углях: условия локализации, формы нахождения, методы извлечения // Докл. Акад. наук. 2009. Т. 424, № 2. С. 239–243.
61. Сорокин А.П., Рождествина В.И., Кузьминых В.М., Жмодик С.М., Аношин Г.Н., Митькин В.Н. Закономерности формирования благородно- и редкометалльного оруденения в кайнозойских угленосных отложениях юга Дальнего Востока // Геология и геофизика. 2013. Т. 54, № 7. С. 876–893.
62. Степанов В.А. Существуют ли ураганные концентрации золота в угольных месторождениях верхнего Приамурья и Сибири? // Руды и металлы. 2010. № 2. С. 66–68.
63. Черепанов А.А. Благородные металлы в золошлаковых отходах дальневосточных ТЭЦ // Тихоокеан. геология. 2008. Т. 27, № 2. С. 16–28.
64. Lavrik N., Henning P. Gold in ash and slag material of the Primorsk hydroelectric power // E3S Web of Conferences. 2020. Vol.192. 03011.
65. Алексейко Л.Н., Таскин А.В., Черепанов А.А., Юдаков А.А. Комплексная переработка золошлаковых отходов ТЭЦ гг. Хабаровск и Биробиджан // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. 2016. № 1 (17). С. 22–34.
66. Леонов С.Б., Федотов К.В., Сенченко А.Е. Промышленная добыча золота из золошлаковых отвалов тепловых электростанций // Горный журн. 1998. № 5. С. 67–68.
67. Сазонов А.М., Гринев О.М., Шведов Г.И., Сотников В.И. Нетрадиционная платиноидная минерализация Средней Сибири. Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 1997. 148 с.
68. Lin M., Bai G., Duan P., Xü J., Duan D., Li Z. Perspective of comprehensive exploitation of the valuable elements of Chinese coal // *Energy Exploration and Exploitation.* 2013. Vol. 31, N 4. P. 623–627.
69. Ценные и токсичные элементы-примеси в товарных углях России: справочник. М.: Недра, 1996. 238 с.
70. Середин В.В. Аномальные концентрации элементов-примесей в месторождении германия Спецугли (Павловское буроугольное месторождение, южное Приморье). Сообщ. 2. Рубидий и цезий // Литология и полезные ископаемые. 2003. № 3. С. 279–287.

REFERENCES

1. Seredin V.V. About new type REE mineralization of Cenozoic coal-bearing basins. *Doklady Akademii Nauk SSSR.* 1991;320:1446-1450. (In Russ.).
2. Seredin V.V. Metalliferous coals: formation conditions and outlooks for development. *Coal Resources of Russia.* Moscow, Geoinformmark; 2004. Vol. 6. P. 452-519. (In Russ.).
3. Seredin V.V. Rare earth element-bearing coals from the Russian Far East deposits. *International Journal of Coal Geology.* 1996;30:101-129.

4. Seredin V.V., Finkelman R.B. Metalliferous coals: A review of the main genetic and geochemical types. *International Journal of Coal Geology*. 2008;76:253-289.
5. Seredin V.V., Dai S. Coal deposits as potential alternative sources for lanthanides and yttrium. *International Journal of Coal Geology*. 2012;94:67-93.
6. Arbuzov S.I., Ershov V.V., Potseluev A.A., Rikhvanov L.P. Rare elements in coals of the Kuznetsk basin. Kemerovo: Kemerovo printing plant; 2000. 246 p. (In Russ.).
7. Arbuzov S.I., Ershov V.V., Rikhvanov L.P., Usova T.Yu., Kyargin V.V., Bulatov A.A., Dubovik N.E. Rare-metal potential of Minusinsk basin coals. Novosibirsk: Geo; 2003. 347 p. (In Russ.).
8. Arbuzov S.I., Ershov V.V. Geochemistry of rare elements in coals of Siberia. Tomsk: D-Print; 2007. 468 p. (In Russ.).
9. Arbuzov S.I., Volostnov A.V., Ershov V.V., Rikhvanov L.P., Mironov V.S., Mashenkin V.S. Geochemistry and metal-bearing of coals in Krasnoyarsk Region. Tomsk: STT; 2008. 300 p. (In Russ.).
10. Arbuzov S.I., Mashenkin V.S., Rybalko V.I., Sudyko A.F. Rare-metal potential of coals in Northern Asia (Siberia, Russian Far East, Kazakhstan, Mongolia). *Geology and Mineral Resources of Siberia*. 2014;3s(2):41-44. (In Russ.).
11. Dai S., Zhou Y., Zhang M., Wang X., Wang J., Song X., Jiang Y., Luo Y., Song Z., Yang Z., Ren D. A new type of Nb(Ta)-Zr(Hf)-REE-Ga polymetallic deposit in the late Permian coal-bearing strata, eastern Yunnan, south-western China: possible economic significance and genetic implications. *International Journal of Coal Geology*. 2010;83:55-63.
12. Dai S., Chekryzhov I.Yu., Seredin V.V., Nechaev V.P., Wang X., Ward C.R., Hower J.C., Graham I.T., Ren D. Metalliferous coal deposits in East Asia (Primorye of Russia and South China): A review of geodynamic controls and styles of mineralization. *Gondwana Research*. 2016;29:60-82.
13. Dai S., Finkelman R.B. Coal as a promising source of critical elements: Progress and future prospects. *International Journal of Coal Geology*. 2018;186:155-164.
14. Nezhensky I.A., Vyalov V.I., Mirkhalevskaya N.V., Kuzevanova E.V. Geological and economic assessment of the rare metal component of brown coal deposits in Primorsky Krai. *Regional Geology and Metallogeny*. 2014;(59):113-120. (In Russ.).
15. Sun Y.Z., Zhao C.L., Li Y.H., Wang J.X., Liu S.M. Li distribution and mode of occurrences in Li-bearing coal seam N 6 from the Guanbanwusu Mine, Inner Mongolia, Northern China. *Energy Exploration and Exploitation*. 2012;30(1):109-130.
16. Sun Y.Z., Zhao C.L., Li Y.H., Wang J.X., Zhang J.Y., Jin Z., Lin M.Y., Kalkreuth W. Further information of the associated Li deposits in Coal Seam 6 at Jungar Coalfield, Inner Mongolia, Northern China. *Acta Geologica Sinica*. 2013;87(4):801-812.
17. Qin S., Zhao C., Li Y., Zhang Y. Review of coal as a promising source of lithium. *International Journal of Oil, Gas and Coal Technology*. 2015;9(2):215-229.
18. Arbuzov S.I., Chekryzhov I.Yu., Spears D.A., Ilenok S.S., Soktoev B.R., Popov N.Yu. Geology, geochemistry, mineralogy and genesis of the Spetsugli high-germanium coal deposit in the Pavlovsk coalfield, Russian Far East. *Ore Geology Reviews*. 2021;139(B). 104537.
19. Vyalov V.I., Bogomolov A.Kh., Shishov E.P., Chernyshev A.A. Coal deposits of the Far East Russia and resource potential of precious metals contained in them. *Georesources*. 2017; Spec. issue(2):256-262. (In Russ.). <http://doi.org/10.18599/grs.19.25>.
20. Vyalov V.I., Nastavkin A.V., Shishov E.P. Distribution of industrially valuable trace elements associated with germanium in the coals of the Pavlovsk deposit (Spetsugli section). *Solid Fuel Chemistry*. 2021;(1):14-25. (In Russ.).
21. Jazikov V.G. Geology-industrial types uranium deposits of Kazakhstan. In: *Radioactivity and radioactive elements in environment: Materials of the II International conference*. Tomsk: Tandem-Art; 2004. P. 754-762. (In Russ.).
22. Mironov Yu.B. Uranium deposits of the Alpine-Himalayan belt. In: *Radioactivity and radioactive elements in environment: Materials of the IV International conference*. Tomsk, June, 4-8, 2013. Tomsk: Tomsk Polytechnic University; 2013. P. 367-370. (In Russ.).
23. Kulibin K.A. Precious metals in hard coal. *Gold and Platinum*. 1908;(24):510-511. (In Russ.).
24. Shakhov F.N., Efendi M.E. To geochemistry of coals of Kuznetsk Basin. *Doklady Akademii Nauk SSSR*. 1946;51(2):135-136. (In Russ.).
25. Katz A.Ya., Kremenetsky A.A., Podkopaev O.I. Germanium as a mineral resource base of the Russian Federation. *Mineral Resources of Russia. Economics and Management*. 1998;(3):5-9. (In Russ.).
26. Kostin Yu.P., Meitov E.S. On the genesis of deposits of high-germanium-bearing coals and the criteria for their search. *Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR. Geological Series* 1972;(1):112-119. (In Russ.).

27. Saprykin F.Ya., Bogdanov V.V. Methodological guide for the study and evaluation of coal deposits for germanium and other rare elements Moscow: Nedra; 1967. 311 p. (In Russ.).
28. Vyalov V.I., Larichev A.I., Kuzevanova Ye.V., Bogomolov A.Kh., Gamov M.I. Rare metals in lignite deposits of Primorye and their resource potential. *Regional Geology and Metallogeny*. 2012;(51):96-105. (In Russ.).
29. Blokhin M.G., Arbuzov S.I., Chekryzhov I.Yu. Study of oxygen and hydrogen isotope ratios of tonsteins, weathering crusts and argillite kaolinite as indicators of its formation environmental conditions. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2022;333(12):46-60. (In Russ.).
30. Avdeev P.B., Kuzhikov A.A., Kuklina G.L. Prospects germanium-coal Tarbagatajsky lignite deposit in Transbaikalia. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2015;(4):26-31. (In Russ.).
31. Vyalov V.I., Nastavkin A.V., Shishov E.P. New data on the metallicity of Sakhalin coals. *Solid Fuel Chemistry*. 2022;6:1-5. (In Russ.).
32. Naidko V.I., Makarov V.A., Koz'min D.G., Shimanskii A.F., Fertikov A.I. Geologic and geochemical features of Cretaceous Ge-bearing lignites in the Yenisei middle reaches. *Russian Geology and Geophysics*. 2019;60(1):86-96. Doi:10.15372/RGG2019006.
33. Yevdokimov A.P., Ozerskiy A.Yu., Yekhanin A.G. Germanium-bearing lignites of the southeastern margin of the West Siberian plate. *Prospect and Protection of Mineral Resources*. 2004;(6):26-29. (In Russ.).
34. Arbuzov S.I., Volostnov A.V., Mezhibor A.M., Rybalko V.I., Ilenok S.S. Scandium (Sc) geochemistry of coals (Siberia, Russian Far East, Mongolia, Kazakhstan, and Iran). *International Journal of Coal Geology*. 2014;125:22-35.
35. Seredin V.V., Arbuzov, S.I., Alekseev V.P. Sc-bearing coals from Yakhlink deposit, Western Siberia. *Doklady Earth Sciences*. 2006;409(6):967-972. (In Russ.).
36. Ilenok S.S., Arbuzov S.I. Metalliferous coals of the Azeyskoe deposit of Irkutsk coal basin. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2018;329(8):132-144. (In Russ.).
37. Kashirtsev V.A., Zueva I.N., Suknev V.S., Mitronov D.V., Syundyukov Sh.A., Andreeva G.V., Kapysheva G.I., Livshits S.Kh., Popov V.I. Paragenetic associations of rare earth elements in Mesozoic coals of the northern part of the Lena basin. *National Geology*. 1999;(4):65-68. (In Russ.).
38. Arbuzov S.I. Nature of anomalous scandium concentrations in coals. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2013;323(1):56-64. (In Russ.).
39. Dai S., Graham I.T., Ward C.R. A review of anomalous rare earth elements and yttrium in coal. *International Journal of Coal Geology*. 2016;159:82-95
40. Dai S., Graham I.T., Ward C.R. A review of anomalous rare earth elements and yttrium in coal. *International Journal of Coal Geology*. 2016;159:82-95.
41. Chekryzhov I.Yu., Nechaev V.P., Trach G.N., Trach D.A. Occurrences of rare-earth mineralization in South Primorye. *Gornyi Zhurnal*. 2018;(2):35-40. (In Russ.).
42. Arbuzov S.I., Spears D.A., Vergunov A.V., Ilenok S.S. Geochemistry, mineralogy and genesis of rare metal (Nb-Ta-Zr-Hf-Y-REE-Ga) coals of the seam XI in the south of Kuznetsk Basin, Russia. *Ore Geology Reviews*. 2019;113. 103073.
43. Arbuzov S.I., Chekryzhov I.Yu., Finkelman R.B., Sun Y.Z., Zhao C.L., Il'enok S.S., Blokhin M.G., Zarubina N.V. Comments on the geochemistry of rare-earth elements (La, Ce, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu) with examples from coals of North Asia (Siberia, Russian Far East, North China, Mongolia, and Kazakhstan). *International Journal of Coal Geology*. 2019;206:106-120.
44. Kosterin A.V., Korolev F.D., Kizyura V.E. Rare earths in the Chikhez lignite deposit. *Geochemistry*. 1963;(7):594-595. (In Russ.).
45. Gorky Yu.I. The main regularities of the distribution of germanium in fossil coals (on the example of the Minusinsk basin). PhD thesis. Minsk; 1972. 184 p. (In Russ.).
46. Shvets V.N., Boyarko G.Yu. On the industrial value of rare earths and germanium deposited in the main target coal seams of South Yakutia. In: *Geology and tectonics of platforms and orogenic regions of northeast Asia: Proceedings of the meeting*. Yakutsk, Yakutsk Scientific Center of the Siberian Division of the Russian Academy of Sciences; 1999. P. 186-189. (In Russ.).
47. Seredin V.V., Chekryzhov I.Y. Ore potentiality of the Vanchin graben, Primorye, Russia. *Geology of Ore Deposits*. 2011;53(3):202-220.
48. Popov N.Yu., Chekryzhov I.Yu., Tarasenko I.A., Kasatkin S.A., Kholodov A.S. Structural and geochemical features of coal-bearing sediments and sources of rare element impurities in coals of the Rakovka depression (Primorsky Krai, Russia). *International Journal of Coal Science and Technology*. 2022;9. 14.

49. Taylor S.R., McLennan S.M., The continental crust: its composition and evolution. Oxford: Blackwell Scientific Publication; 1985. 312 p.
50. Rosljakov N.A., Kalinin Ju.A., Rosljakova N.V., Antsyrev A.A., Pakhomov V.G. Exogenic concentrating of radionuclides in peatbogs and in weathering crusts of the Novosibirsk region. In: *Radioactivity and Radioactive Elements in Environment: Materials of the 2nd International conference*. Tomsk: Tandem-Art; 2004. P. 522-526. (In Russ.).
51. Kislyakov Ya.M., Shchetochkin V.N. Hydrogenic ore formation. Moscow: Geoinformmark; 2000. 610 p. (In Russ.).
52. Shvartsev S.L. Hydrogeochemistry of the hypergenesis zone. 2nd ed. revised and supplemented. Moscow: Nedra; 1998. 366 p. (In Russ.).
53. Gavrilin K.V., Ozersky A.Yu. Kansk-Achinsk coal basin. Moscow: Nedra; 1996. 272 p. (In Russ.).
54. Arbuzov S.I., Volostnov A.V., Rikhvanov L.P., Mezhibor A.M., Ilenok S.S. Geochemistry of radioactive elements (U, Th) in coal and peat of northern Asia (Siberia, Russian Far East, Kazakhstan, and Mongolia). *International Journal of Coal Geology*. 2011;86:318-328.
55. Monnet A., Percebos J., Gabriel S. Assessing the potential production of uranium from coal-ash milling in the long run. *Resources Policy*. 2015;45:173-182.
56. Finkelman R.B., Arbuzov S.I. Radioactive elements in coal and their possible impacts. In: *Radioactivity and Radioactive Elements in Environment: Materials of the VI International Conference* (Tomsk, September 20–24, 2021). Tomsk: Publishing House of Tomsk Polytechnic University; 2021. Vol. 1. P. 47-49. (In Russ.).
57. Seredin V.V. The first data on abnormal niobium content in Russian coals. *Doklady Rossijskoj Akademii Nauk*. 1994;335(5):634-636. (In Russ.).
58. Vergunov A.V., Arbuzov S.I., Eremeyeva V.V. Mineralogy, geochemistry and genesis of rare-metal Zr-Nb-Hf-Ta-REE-Ga mineralization in bed XXX of Minusinsk Basin. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2020;331(7):49-62. (In Russ.).
59. Arbuzov S.I., Rikhvanov L.P., Maslov S.G., Arhipov V.S., Belyaeva A.M. Anomalous gold contents in brown coals and peat in the south-eastern region of the Western-Siberian platform. *International Journal of Coal Geology*. 2006;68(3/4):127-134.
60. Sorokin A.P., Kuz'minykh V.M., Rozhdestvina V.I. Gold in brown coals: localization conditions, modes of occurrence, and methods of extracting. *Doklady Earth Sciences*. 2009;424(1):109-113.
61. Sorokin A.P., Rozhdestvina V.I., Kuz'minykh V.M., Zhmodik S.M., Anoshin G.N., Mitkin V.N. The regularities of formation of noble- and rare-metal mineralization in Cenozoic coaliferous deposits in the southern Far East. *Russian Geology and Geophysics*. 2013;54(7):671-684.
62. Stepanov V.A. Are there any extremely high gold concentrations in coal beds of the Upper Amur Region and Siberia? *Ores and metals*. 2010;(2):66-68. (In Russ.).
63. Cherepanov A.A. Noble metals in ash-cinder wastes of the Far East thermal power plants. *Russian Journal of Pacific Geology*. 2008;2(2):110-121.
64. Lavrik N., Henning P. Gold in ash and slag material of the Primorsk hydroelectric power. *E3S Web of Conferences*. 2020;192. 03011. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019203011>.
65. Alekseyko L.N., Taskin A.V., Cherepanov A.A., Yudakov A.A. Extraction of the valued components from the bottom ash waste of the Khabarovsk and Birobidzhan TPPS. *Modern Science: Research, Ideas, Results, Technologies*. 2016;17(1):22-34. (In Russ.).
66. Leonov S.B., Fedotov K.V., Senchenko A.E. Commercial gold extraction from the bottom-ash dumps of the thermal electric power stations. *Mining Journal*. 1998;(5):67-68. (In Russ.).
67. Sazonov A.M., Grinev O.M., Shvedov G.I., Sotnikov V.I. Unconventional platinoid mineralization in Central Siberia. Tomsk: Publishing House of the Tomsk Polytechnic University; 1997. 148 p. (In Russ.).
68. Lin M., Bai G., Duan P., Xü J., Duan D., Li Z. Perspective of comprehensive exploitation of the valuable elements of Chinese coal. *Energy Exploration and Exploitation*. 2013;31(4):623-627.
69. Valuable and toxic elements of the commodity coals of Russia. The manual. Moscow: Nedra; 1996. 238 p. (In Russ.).
70. Seredin V.V. Anomalous concentrations of trace elements in the Spetsugli germanium deposits (Pavlovka brown coal deposit, southern Primorye): communication 2. Rubidium and cesium. *Lithology and Mineral Resources*. 2003;(3):279-287. (In Russ.).