

УДК 550.42:552.57
DOI: 10.18799/24131830/2025/9/5257
Шифр специальности ВАК 1.6.4, 1.6.10
Научная статья

Скандиеносные угли Шаимского нефтегазоносного района Западно-Сибирского бассейна

С.И. Арбузов^{1,2✉}, С.С. Ильенок², А.С. Торопов³, А.С. Холодов¹

¹ Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Россия, г. Владивосток

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

³ Московский государственный университет, Россия, г. Москва

✉ siarbuzov@mail.ru

Аннотация. *Актуальность* обусловлена необходимостью выявления новых источников промышленного получения стратегических, критически важных для современных технологий металлов. *Цель.* Исследование геолого-геохимических условий формирования аномальных концентрации скандия в углях западной части Западно-Сибирского бассейна. *Методы.* Комплекс современных аналитических методов, в том числе ICP MS, ИНАА, сканирующая электронная микроскопия; методы математической статистики; геолого-геохимический анализ условий миграции и концентрирования элементов. *Результаты и выводы.* В западной части Западно-Сибирского бассейна в пределах Шаимского нефтегазоносного района выявлены аномально скандиеносные угли, не имеющие аналогов в мировой практике. Максимальные содержания Sc в угле достигают 83,6 г/т, а в золе угля – 0,4 %. В перспективе это новый промышленно-генетический тип месторождений скандия. Наряду со Sc зола углей аномально обогащена группой сидерофильных и литофильных металлов, в том числе Zr, Ge, Nb, Y и иттриевыми лантаноидами. Формы нахождения скандия в углях и характер его распределения в угольных пластах свидетельствуют о гидрогенном механизме формирования аномалий. Проведенные исследования показали, что формирование аномально скандиеносных углей связано со спецификой состава пород фундамента этой части Западно-Сибирского бассейна, характеризующегося значительной долей пород базит-гипербазитового состава, и с развитием по ним кор выветривания, обусловивших формирование углевмещающих пород, изначально обогащенных скандием. В процессе диагенеза и раннего катагенеза в угленосных толщах формировались содовые воды, благоприятствовавшие переходу Sc терригенных отложений и, частично, погребенных кор выветривания в раствор и перераспределение его в угольные пласты с формированием в углях уникально высоких его концентраций. Ориентируясь на размеры исследованной площади, мощности скандиеносных пластов и среднее содержание в них металла, можно оценить прогнозные ресурсы Sc в 250 тыс. т.

Ключевые слова: Sc-носные угли, Западно-Сибирский бассейн, условия накопления, формы нахождения, редкометалльный потенциал

Для цитирования: Скандиеносные угли Шаимского нефтегазоносного района Западно-Сибирского бассейна / С.И. Арбузов, С.С. Ильенок, А.С. Торопов, А.С. Холодов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 9. – С. 239–254. DOI: 10.18799/24131830/2025/9/5257

UDC 550.42:552.57
DOI: 10.18799/24131830/2025/9/5257
Scientific paper

Scandium-bearing coals of the Shaim oil and gas region of the West Siberian basin

S.I. Arbuzov^{1,2✉}, S.S. Ilenok², A.S. Toropov³, A.S. Kholodov¹

¹ Far East Geological Institute, Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation

² National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

³ Moscow State University, Moscow, Russian Federation

✉ siarbuzov@mail.ru

Abstract. Relevance. The need to identify new sources of industrial production of strategic metals that are critical for modern technologies. **Aim.** To study the geological and geochemical conditions that led to the formation of anomalous scandium concentrations in the coals of the western part of the West Siberian Basin. **Methods.** A range of modern analytical methods, including ICP-MS, INAA and scanning electron microscopy; statistical methods; geological and geochemical analysis of the migration and concentration of elements. **Results and conclusions.** In the western part of the West Siberian Basin, within the Shaim oil- and gas-bearing region, the authors have discovered the coals containing anomalous amounts of scandium, with no analogues in world practice. The maximum Sc content in coal is 83.6 ppm and in coal ash is 0.4%. In the future, this is a new industrial and genetic type of scandium deposits. Alongside Sc, coal ashes are also anomalously enriched in a group of siderophilic and lithophilic metals, including Zr, Ge, Nb, Y, and yttrium lanthanides. The forms of scandium occurrence in coal and the character of its distribution in coal seams point to a hydrogenic mechanism of anomaly formation. Studies shown that uniquely scandium-bearing coals are formed in areas with specific basement rock compositions, characterized by a significant proportion of basite-hyperbasite rocks. Weathering of these rocks leads to the formation of coal-bearing rocks enriched in scandium. During diagenesis and early catagenesis, soda water were formed in coal-bearing strata, favouring the transfer of scandium from terrigenous sediments and buried weathering crusts into solution, as well as its redistribution into coal seams, resulting in uniquely high scandium concentrations in coal. Based on the size of the studied area, the thickness of scandium-bearing strata, and the average metal content within them, the inferred resources of scandium can be estimated at 250 thousand tons.

Keywords: Sc-bearing coals, West Siberian basin, accumulation conditions, modes of occurrence, rare metal potential

For citation: Arbuzov S.I., Ilenok S.S., Toropov A.S., Kholodov A.S. Scandium-bearing coals of the Shaim oil and gas region of the West Siberian basin. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 9, pp. 239–254. DOI: 10.18799/24131830/2025/9/5257

Введение

Проведенные за последние несколько десятилетий массовые исследования элементов-примесей в угольных месторождениях и бассейнах на всех континентах показали, что угли являются концентраторами многих ценных металлов, в том числе редких и рассеянных, таких как Ge, REE, Sc, Ga, Nb и другие [1–7]. Особый интерес среди них представляет скандий как элемент, почти не имеющий собственных промышленных месторождений и извлекаемый обычно попутно при разработке руд других металлов, но нередко образующий аномалии в золах углей вплоть до промышленно значимых концентраций [1, 8–18].

Согласно прогнозам, спрос на скандий на мировом рынке увеличится в ближайшие годы из-за нового спроса на передовые материалы, такие как легкие алюминиевые сплавы и керамика для топливных элементов. Поскольку традиционные природные ресурсы могут не обеспечить достаточные объемы этого критически важного металла по приемлемым ценам, необходимо изучить новые источники, принимая во внимание в том числе экологические проблемы [19]. Скандий входит в перечень основных видов стратегического минерального сырья, утвержденный распоряжением Правительства РФ от 30.08.2022 № 2473-р. При этом его добыча с получением товарной продукции началась сравнительно недавно и в недостаточных объемах. В стране ведутся работы по попутному получению Sc из растворов при подземном выщелачивании урана и из отходов глиноземного производства («красных шламов»). Рост производства алюмо-скандиевых лигатур в России обусловил рост потребления оксида скандия,

что в свою очередь требует активизации деятельности по добыче и переработке сырьевых ресурсов этого стратегического металла [20].

Западно-Сибирский осадочный бассейн обладает уникальными угольными ресурсами. По предварительным оценкам, основанным на исследовании многочисленных скважин нефтяного бурения, они превышают 34,5 трлн т [21], что в 2,3 раза выше официально учтенных мировых ресурсов угля [22]. Угли Западно-Сибирского бассейна разнообразны по возрасту и качественным характеристикам. Здесь распространены угли юрского, мелового и палеогенового возрастов. Элементы-примеси в углях бассейна изучены крайне слабо, но даже эти немногочисленные данные свидетельствуют о своеобразии их геохимической специализации. Угли бассейна отличаются повышенными содержаниями золота и скандия, на отдельных участках достигая аномально высоких и даже уникальных для углей концентраций [12, 14, 15, 23]. В ряде случаев содержание золота и скандия достигает потенциально промышленных значений. Здесь впервые в юго-западной части бассейна в пределах Шаимского нефтегазоносного района на Яхлинском нефтяном месторождении нами была описана аномалия скандия в золе угля, достигающая 0,13 % [15]. Природа этой аномалии не была выяснена. Впоследствии одним из авторов этой работы В.П. Алексеевым было выполнено дополнительное опробование угольных пластов и пропластков в тюменской свите еще на пяти участках общей протяженностью в субмеридиональном направлении более 150 км. В процессе исследований в них были установлены уникальные для углей содержания

скандия, достигающие в золе углей отдельных пластов 0,4 %. О фактах выявления в углях подобных аномалий ранее не сообщалось. Согласно обзору [1, 24], в мировой практике наибольшие установленные содержания в золе угля не превышают 1320 г/т, в углях – 38 г/т. Данная работа посвящена исследованию закономерностей формирования таких уникальных аномалий скандия в углях Западно-Сибирского бассейна.

Геологическая характеристика района

Исследуемый район расположен в самой западной части Западно-Сибирского осадочного бассейна (рис. 1) в непосредственном контакте с Уральской складчатой областью. В геологическом отношении он охватывает Шаимский мегавал и прилегающие к нему с запада и севера территории.

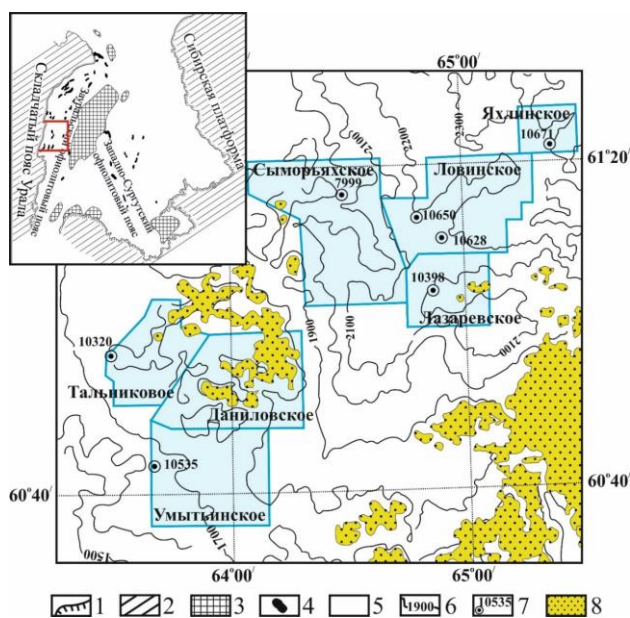


Рис. 1. Геолого-структурная схема Шаимского нефтегазоносного района и размещение изученных скважин (по [25] с изменениями): 1 – контур мезо-кайнозойского чехла Западно-Сибирской плиты; 2 – структуры обрамления Западно-Сибирской плиты; 3 – погребенные выступы докембрийского основания; 4 – офиолиты; 5 – отложения тюменской свиты (J_2); 6 – изогипсы поверхности фундамента; 7 – скважина и ее номер; 8 – выступы доюрского фундамента среди отложений тюменской свиты

Fig. 1. Geological and structural scheme of the Shaim oil and gas region and the location of the studied wells (based on [25], modified): 1 – contour of the Mesozoic-Cenozoic cover of the West Siberian Plate; 2 – structures adjacent to the West Siberian Plate; 3 – buried protrusions of the Precambrian basement; 4 – ophiolites; 5 – deposits of the Tyumen Formation (J_2); 6 – contour lines of the basement surface; 7 – well and its number; 8 – protrusions of the pre-Jurassic basement among deposits of the Tyumen Formation

В строении фундамента, залегающего на глубинах от 1,5 до 2,3 км от современной поверхности, основное участие принимают два структурных этажа [26]. Нижний представлен разновозрастными, преимущественно палеозойскими комплексами, характерными для Уральского складчатого пояса (от гранитоидов до серпентинитов, включая терригенно-карбонатные отложения). Верхний этаж сложен триасовыми вулканогенными толщами, которыми выполнен ряд грабенных. Фундамент этой части бассейна представлен преимущественно породами основного состава: базальтами раннего триаса, габбро-долеритами. Значительная часть фундамента Шаимского нефтегазоносного района входит в состав Зауральского офиолитового пояса. Здесь проявлен палеозойский офиолитовый комплекс, представленный меланжированными серпентинитами, габброидами, плагиогранитами, базальтами с прослоями яшм [27]. Западнее и восточнее расположены поднятия, представленные гранитоидами преимущественно раннепермского возраста и кристаллическими сланцами обрамления гранитных массивов. По породам фундамента развиты коры выветривания. Предполагается формирование латеритной коры выветривания [28], однако скважинами вскрыты лишь гидрослюдисто-каолиновые профили выветривания. Наличие в близлежащих районах латеритных кор выветривания позволяет предполагать, что латеритный профиль в этом регионе имел место, но в период после его образования и до перекрытия коры юрскими отложениями верхняя зона (конечного гидролиза) была эродирована [29]. Специфика состава пород фундамента исследуемого района и развитие по ним кор выветривания предполагает важную роль сидерофильных и халькофильных элементов в формировании перерывающего его осадочного чехла [30].

Осадочный чехол нижней части разреза сложен песчано-алевролит-аргиллитовыми отложениями триас-юрского возраста. Общая мощность чехла в связи с блоковым строением фундамента неоднородна и на отдельных участках превышает 2200 м [29]. Исследуемые угольные пласты и прослои сосредоточены в тюменской свите среднеюрского возраста. Мощность свиты в исследуемом районе колеблется от 25 до 150 м вплоть до полного выклинивания. Общая угленасыщенность свиты достаточно велика – 3,3 %, для пластов с мощностью 0,7 м и более – 2,1 % [25]. В размещении угленасыщенности по разрезу свиты установлены отчетливые закономерности (рис. 2). Главная из них заключается в общем распределении угольной массы. Минимальная угленасыщенность, часто при ее полном отсутствии, характерна для верхней части свиты. Это связано с мелководно-бассейновыми

условиями формирования отложений этой части разреза. Напротив, высокая угленосность с почти повсеместным наличием угольных пластов мощностью 1–2 м и более характерна для самой нижней части свиты. Здесь коэффициент угленосности составляет 7,3 %, в том числе по пластам мощностью 0,7 м и более – 5,7 % [25]. Средняя часть свиты характеризуется средними параметрами угленасыщенности. Другая закономерность заключается в весьма равномерном распределении по большей части тюменской свиты прослоев и тонких пластов угля мощностью менее 0,7 м.

Литологический анализ показал, что в нижней части свиты угли сформировались в условиях озерно-аллювиального ландшафта, лишь частично перекрываясь прибрежно-бассейновыми и заливными отложениями. Для верхней ее части типичен аллювиально-бассейновый тип торфонакопления, что соответствует общей тенденции изменения обста-

новок формирования отложений в процессе геологического времени [25].

Детальные минералого-геохимические исследования осадочных отложений Шаимского района показали, что в составе песчано-алевритовых отложений наряду с продуктами преобразования гранитоидов значительную роль играли породы основного состава. На это указывает как наличие в их составе значительного количества хлорита, сидерита, глауконита, монтмориллонита, пироксенов, сульфидов железа, так и, в большей степени, геохимические данные [26, 31, 32]. В частности, на важную роль пород основного состава указывает пониженное La/Yb отношение, слабо выраженная европиевая аномалия, Os+Ir+Ru+Pt-специализация мелкозернистых терригенных пород [33]. В составе осадков отмечаются повсеместно аномалии Cr, Ni, Co, в ряде случаев повышено содержание Fe, Sc и в целом понижены по сравнению со средними данными для осадочных пород уровни накопления U и Th [26].

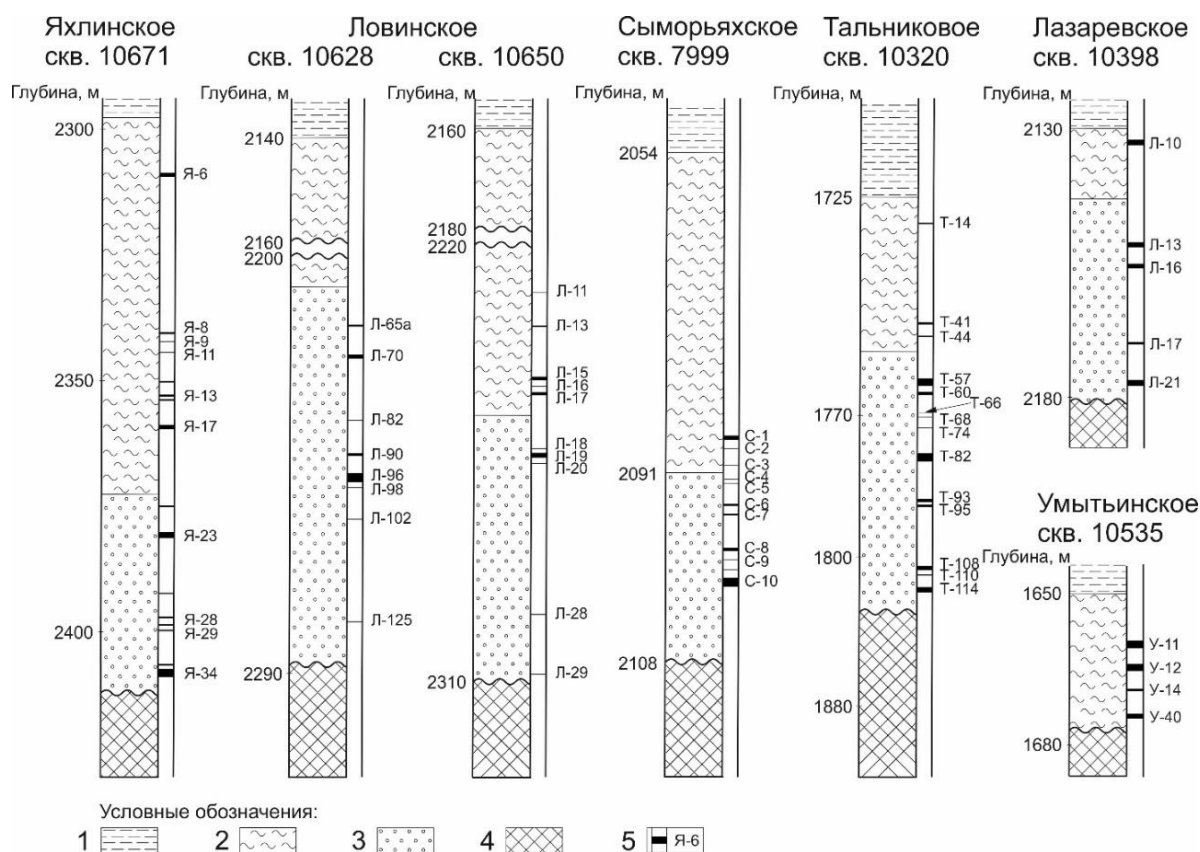


Рис. 2. Обобщенные геологические разрезы тюменской свиты по скважинам, вскрывшим скандиеносные угли в различных месторождениях Шаимского нефтегазоносного района (по [25] с дополнениями) (схема размещения скважин – на рис. 1): 1 – морские отложения (J₃); 2, 3 – континентальные угленосные отложения тюменской свиты (J₁₋₂); 2 – прибрежно-бассейновые; 3 – озерно-аллювиальные; 4 – породы фундамента; 5 – угольные пласты с номерами проб

Fig. 2. Generalized geological sections of the Tyumen Formation, based on wells that uncovered scandium-bearing coals in various fields in the Shaim oil and gas region (based on [25], modified) (See Fig. 1 for the well placement scheme): 1 – marine sediments (J₃); 2, 3 – continental, coal-bearing sediments of the Tyumen Formation (J₁₋₂); 2 – coastal basin; 3 – lake-alluvial; 4 – basement rocks; 5 – coal seams with sample numbers

Методика исследования

Опробование

Основой для подготовки работы являются результаты количественного анализа Sc в 88 пробах угля из 7 скважин 6 углепроявлений. Опробование угольных пластов выполнялось по керну нефтяных скважин. Длина интервала опробования выбиралась в зависимости от мощности и сложности строения пласта и изменялась в среднем от 0,05 до 1,5 м. Маломощные угольные пласты опробовались одной пробой. Изменчивость содержания скандия по латерали оценивалась на основании сравнения данных по разным углепроявлениям на протяжении всего исследованного района. Общая протяженность профиля опробования с юго-запада на северо-восток составляет более 160 км, с юго-востока на северо-запад – 50 км (рис. 1).

Аналитические методы

Определение содержания Sc во всех пробах выполнено инструментальным нейтронно-активационным анализом (ИНАА) непосредственно в угле без предварительного концентрирования с целью избежать потерь некоторого количества металла при озолении. Лабораторное определение Sc в углях, золах углей и породах производилось в Ядерно-геохимической лаборатории Международного инновационного научно-образовательного центра (МИНОЦ) «Урановая геология» им. Л.П. Рихванова Национального исследовательского Томского политехнического университета (ЯГЛ ТПУ) (исполнитель А.Ф. Судыко). Облучение проб нейтронами выполнено на исследовательском ядерном реакторе ИРТ-Т физико-технического института ТПУ. Для определения содержания элементов-примесей использовали метод ИНАА из навески 100–200 мг. Предел обнаружения Sc в углях методом ИНАА – 0,02 г/т. Качество нейтронно-активационного анализа контролировалось по различным стандартам золы угля и горных пород (табл. 1).

Таблица 1. Определение скандия в стандартных образцах

Table 1. Determination of scandium in standard samples

Стандартный образец Standard sample	Паспортные данные, г/т Passport data, ppm	ЯГЛ ТПУ TPU NGL
Риолит JR-1/Rhyolite JR-1	5,07±0,54	5,4±0,1
Риолит JR-2/Rhyolite JR-2	5,59±1,22	5,5±0,1
Гранит JG-2/Granite JG-2	2,42±0,42	2,4±0,04
Гранодиорит JG-3/Granodiorite JG-3	8,76±0,55	8,7±0,12
ЗУК-1 GCO 7125-94/ZUK-1 GSO7125-94	11,0±1,0	11,1±0,3
ГБПг-1 (гранат-биотитовый плагиогнейс) Garnet-biotiteplagiogneiss GBP-1	14,3±2,2	14,5±0,2
СЛг-1 (черный сланец)/Dark shale GSL-1	20,0±3,0	21,0±0,5

NGL – Nuclear Geochemical Laboratory.

Для основного массива проб выполнено параллельное определение Sc вместе с комплексом других элементов-примесей масс-спектрометрическим методом с индуктивно связанной плазмой в Дальневосточном геологическом институте ДВО РАН, г. Владивосток (исполнитель Н.В. Зарубина), Московском государственном университете, г. Москва (исполнитель А.С. Торопов), Институте проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН, г. Черноголовка (исполнитель В.К. Карандашев). Сходимость результатов различных методов анализа удовлетворительная (рис. 3).

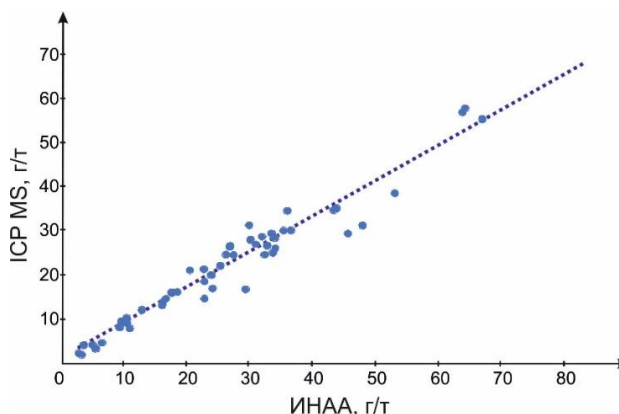


Рис. 3. Сходимость результатов определения скандия методом ИНАА и ICP MS

Fig. 3. Convergence of results for scandium determination using the INAA and ICP-MS methods

Для контроля параллельно определяли скандий в углях и золах углей, с соответствующими пересчетами содержаний в золе на уголь и наоборот. Как показывают эксперименты, измеренное содержание в золе угля в основном ниже, чем расчетное значение. В ряде исследований установлено, что потери Sc в процессе лабораторного озоления могут быть значительны [9, 11]. По-видимому, потери скандия при воздействии высоких температур – явление достаточно распространенное и зависит от формы его нахождения в угле. О факте значительных потерь скандия при озолении обогащенных им углей из северной части Ленского бассейна сообщалось в работе [9]. Переход скандия в газовую фазу в количестве 8 % отмечается при сжигании даже обедненных им антрацитов Донецкого бассейна [34]. При исследовании углей Минусинского бассейна потери скандия в процессе озоления проб в среднем составили 40 % при вариациях от 13 до 80 %. В общем случае величина потерь зависит от содержания металла в пробе [11]. В данной работе исследованы угли, уникально обогащенные скандием, что сказалось на его потерях при озолении проб. Для исследованных проб угля потери Sc при

озолении в большинстве случаев относительно не велики и обычно составляют не более 20 %, но в отдельных пробах могут превышать 50 %.

Оценка среднего содержания Sc в углях выполнялась путем последовательного усреднения данных. Средние содержания Sc в угольных пластах рассчитывались как средневзвешенные по мощности интервалов опробования, в углепроявлениях – как средневзвешенные по мощности пластов [12].

Минеральные формы скандия изучались на сканирующем электронном микроскопе Hitachi 3400S (исполнитель С.С. Ильенко). Исследованы образцы угля и золы углей.

Выбранный комплекс аналитических методов позволяет с высокой надежностью оценить содержание, закономерности распределения и условия концентрирования скандия в углях.

Содержание и закономерности распределение скандия в углях

Среднее содержание скандия в углях и золах углей шести изученных участков Шаимского района показано в табл. 2. Как следует из этих данных средние оценки для углепроявлений превышают кларк для угля в 4,5–9,6 раза. В связи с низкой зольностью углей для золы угля это превышение составляет 9,3–33,7 раз. Средняя оценка для угля исследованного участка превышает кларковое значение в 7 раз, а для золы угля – более чем в 18 раз.

Таблица 2. Среднее содержания скандия (г/т) и зольность (%) углей основных нефтяных месторождений Шаимского района

Table 2. Average scandium content (ppm) and ash yield (%) of coals from the main oil deposits of the Shaim region

Месторождение Deposit	Число проб Number of samples	A ^d , %	Содержание Sc, г/т Sc content, ppm	
			В угле Coal	В золе угля** Coal ash**
Яхлинское/Yakhliinskoe	12	5,2	20,2	388
Ловинское/Lovinskoe	18	4,1	31,8	776
Лазаревское/Lazarevskoe	5	7,4	37,6	508
Умытйинское/Umytinskoe	4	7,1	23,2	327
Тальниковое/Talnikovoe	17	8,3	27,6	333
Сыморьяхское/Symoryakhskoe	32	8,2	18,4	224
Среднее/Mean	88	6,6±0,8	26,5±3,0	400
Кларк для угля/Clarke for coals*			3,9	23

Примечание: * – по [35]; ** – расчетные значения.

Note: * – according to [35]; ** – calculated values.

Содержание металла в угле в локальных разрезах по отдельным пластам достигает 83,6 г/т в углях и 0,4 % в золе угля (табл. 3). Максимально обогащенные скандием пласты угля характеризуются, как правило, малой мощностью в пределах 0,1–0,5

м и низкой зольностью, что указывает на их формирование в стабильной тектонической обстановке в условиях слабопроточных или застойных водоемов [25]. В ряде случаев их зольность менее 1 %.

Таблица 3. Пласты и пропластки угля с аномально высоким содержанием Sc

Table 3. Coal seams and interlayers with anomalously high Sc content

Месторождение Deposit	Номер пробы Sample number	Мощность пласта, м Bed thickness, m	A ^d , %	Содержание Sc, г/т Sc content, ppm	
				В угле In coal	В золе угля* In coal ash*
Яхлинское Yakhliinskoe	Я-71-11	0,10	4,7	43,4	920
	Я-71-17	0,30	0,78	10,3	1300
Ловинское Lovinskoe	Л-28-65a	0,10	1,7	25,9	1520
	Л-28-98	0,10	6,8	63,7	940
	Л-28-102a	0,10	2,1	83,6	3980
	Л-50-11	0,05	1,7	47,5	2790
	Л-50-16	0,15	2,7	31,6	1170
Лазаревское Lazarevskoe	Л-50-26	0,15	2,3	63,3	2750
	Л-98-16	0,20	2,2	52,6	2390
Умытйинское Umytinskoe	Л-98-17	0,20	0,9	33,3	3700
	У-35-14	0,10	4,7	26,5	564
Тальниковое Talnikovoe	Т-20-44	0,30	10,7	66,4	620
	Т-20-68	0,10	4,0	45,2	1130
	Т-20-74	0,20	2,4	36,2	1510
	Т-20-110	0,10	6,8	42,9	630
Сыморьяхское Symoryakhskoe	С-99-1ya	0,10	4,8	20,6	429
	С-99-3	0,05	7,3	29,8	408
Среднее для района/Average for the area			6,6	26,5	400

Примечание: * – расчетные значения.

Note: * – calculated values.

Из всего массива данных (88 проб) только 4 пробы угля характеризуются содержаниями, близкими к кларку. Все пробы с околоскандиевыми содержаниями Sc приурочены к наиболее мощным пластам угля, преимущественно к их центральной части. Остальные пробы аномально обогащены скандием.

Золы скандиеносных углей также аномально обогащены группой сидерофильных (Cr, V, Ni, Co, Fe, Ge), халькофильных и некоторых литофильных элементов (табл. 4). Из группы литофилов наиболее существенное обогащение отмечено для Zr, Hf, Sr, Ba, Be, Ga, Nb, Y и иттриевых лантаноидов. Содержание Zr в золе в отдельных пробах достигает 6,5 %, Be – 0,15 %, Y – 0,1 %, Ge – 0,58 %. Помимо рассматриваемой группы элементов в углях и золах углей отмечены аномальные концентрации благородных металлов (Au и Ag). Эти аномалии не повсеместны. Из всей совокупности проб только в 24 выявлены аномальные содержания Au. В отдельных пробах золы угля содержание Au достигает 6,6 г/т.

Таблица 4. Микроэлементный состав золы углей с аномально высоким содержанием скандия, г/т

Table 4. Trace element composition of coal ash with anomalously high scandium content, ppm

Элемент Element	Л-28-98	Л-50-11	Л-50-16	Л-50-26	Л-98-16	Л-98-17	Т-20-68	Т-20-74	Кларк* Clark value *
Li	30,9	110	192	15,8	131	70,8	58,0	93,5	33
Be	48,7	628	149	234	966	1514	506	677	1,9
Sc	940	2790	1170	2750	2390	3700	1130	1510	9,6
V	2120	14130	4790	16600	1070	13980	12000	20420	91
Cr	2130	4380	5730	5690	3100	5700	7240	10330	58
Co	251	888	800	1880	1090	2110	338	263	14
Ni	772	6370	1480	4700	3860	8410	1580	1960	37
Cu	230	496	170	313	330	294	240	429	31
Zn	66,0	708	443	405	192	1490	730	1050	43
Ga	78,8	777	281	418	386	797	326	531	12
Ge	153	2410	178	3930	1680	5790	200	276	1,4
As	10,2	49,0	31,3	52,0	35,9	55,1	141	193	7,6
Rb	40,5	30,9	4,4	10,9	6,8	25,9	6,5	10,9	94
Sr	5390	924	12300	1460	2110	2480	2720	4640	270
Y	214	568	831	392	1033	604	259	431	29
Zr	714	45900	6760	19900	21030	64900	8720	15700	170
Nb	32,7	844	116	95,9	209	518	230	359	7,6
Mo	3,2	4,8	50,8	6,9	23,6	28,3	12,3	8,0	1,5
Ag	1,8	52,7	7,8	22,0	76,4	71,6	30,8	17,1	0,12
Cd	0,4	30,5	4,1	12,5	0,7	39,8	3,5	15,2	0,8
Sn	4,5	12,0	7,7	8,0	12,0	12,1	5,1	11,0	2,9
Sb	254	1350	199	2670	531	1270	68,0	88,6	1,2
Cs	2,9	2,3	0,3	0,7	0,9	2,2	0,8	1,0	7,7
Ba	2560	8640	13300	1860	17600	19900	14300	23900	410
La	200	69,2	844	19,5	132	70,2	32,5	43,5	32
Ce	525	196	1640	67,9	276	189	80,8	122	52
Pr	51,0	29,0	160	9,0	37,9	24,7	11,8	18,4	6,8
Nd	206	146	667	62,3	180	135	61,4	102	24
Sm	42,1	52,5	134	32,5	62,3	43,7	25,0	42,9	5,5
Eu	12,8	17,3	34,2	12,2	24,0	17,5	10,7	15,5	0,94
Gd	51,5	72,6	175,2	46,9	92,2	64,8	36,9	64,4	4,0
Tb	7,5	31,3	27,0	10,5	21,0	13,8	8,0	13,7	0,69
Dy	46,5	110	172	78,0	161	104,1	55,0	93,4	3,6
Ho	10,0	22,5	33,9	18,1	39,2	24,5	12,0	18,9	0,92
Er	30,4	73,0	100	61,4	123	82,2	35,3	59,0	1,7
Tm	4,3	9,2	12,3	9,5	18,2	10,4	5,1	7,6	0,78
Yb	30,7	61,8	83,2	66,5	121,7	75,2	32,8	52,9	2,0
Lu	4,8	9,1	12,5	10,7	19,3	11,7	5,2	8,1	0,44
Hf	13,2	854	149	296	426	967	235	340	3,9
Ta	0,6	4,2	1,1	0,9	2,8	1,7	1,5	2,1	1,0
W	0,8	5,1	64,2	5,2	49,9	9,5	6,0	10,0	2,0
Tl	1,1	6,7	3,2	3,9	4,2	10,9	3,4	5,5	0,89
Pb	327	727	222	233	106	757	57,9	97,2	12,0
Bi	1,5	9,2	4,0	8,7	4,9	10,7	7,3	13,9	0,26
Th	25,4	119,5	36,2	28,6	49,6	32,8	63,5	101,0	7,7
U	14,3	68,8	15,6	17,3	54,2	33,1	55,4	88,3	3,4
Fe, %	0,88	10,0	8,9	29,1	7,3	7,8	10,8	5,0	3,54
A ^d , %	6,8	1,7	2,7	2,3	2,2	0,90	4,0	2,4	

Примечание: * – по данным [36].

Note: * – according to [36].

Латеральная изменчивость проявлена не очень ярко, но отчетливо просматривается пространственная взаимосвязь уровней накопления Sc с доюрскими поднятиями. Наиболее обогащены им угольные пласты и пропластки Лазаревского и Ловинского участков, непосредственно примыкающих к юго-восточному поднятию, а также угли участка Тальниковый, примыкающие к централь-

ному поднятию (рис. 1). Угли Сыморьяхского, Яхлинского и Умытынского участков обогащены скандием в существенно меньшей степени.

В разрезе угольного пласта распределение Sc также неравномерно с обогащением верхней (прикровельной) и нижней (припочвенной) его части (рис. 4). Характер распределения указывает на водный механизм накопления скандия в углях.

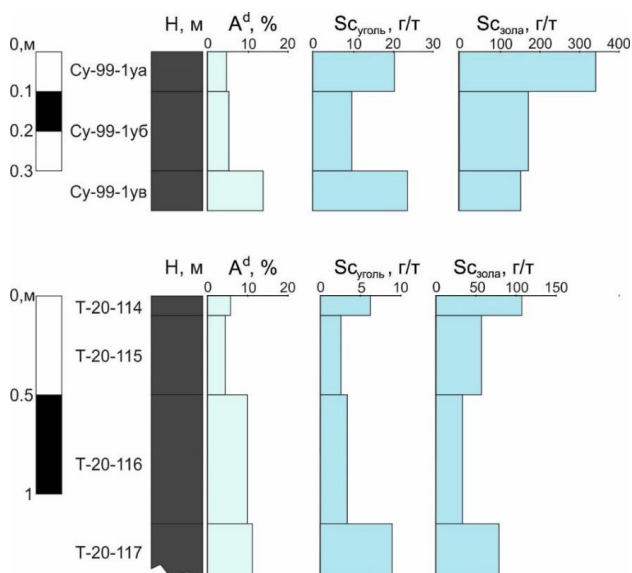


Рис. 4. Распределение зольности и содержания скандия в угле и золе угля в вертикальном разрезе угольного пласта

Fig. 4. Distribution of ash yield and scandium content in coal and coal ash in the vertical section of the coal seam

Для маломощных угольных пропластков характерны наиболее высокие содержания скандия. При этом они характеризуются в основном крайне низкой зольностью, иногда менее 1 %. Для углей этого района отмечен феномен «аномально низкой зольности» [25], что, по мнению авторов, обусловлено чрезвычайно низким темпом закрепления осадочного материала в разрезе. В современных условиях это соответствует условиям формирования верхних олиготрофных торфяников. Значительное время перерывов способствовало закреплению в разрезе чистых торфяников, не засоренных кластогенной золой. Эта взаимосвязь отчетливо просматривается на графиках зависимости содержания скандия от зольности угля (рис. 5).

Из рисунков и из результатов корреляционного анализа следует, что уровни накопления скандия в угле не имеют выраженной связи с зольностью. В то же время золы углей показывают ярко выраженную отрицательную корреляцию содержания скандия в золе угля с зольностью ($r = -0,68$).

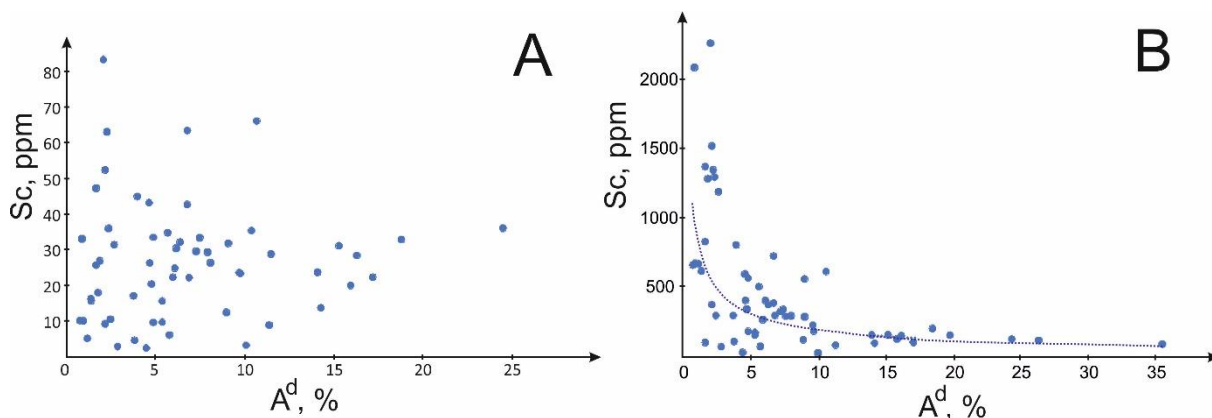


Рис. 5. Связь содержания скандия в углях (А) и золах углей (В) с зольностью углей
Fig. 5. Correlation of scandium content in coal (А) and coal ash (В) with ash yield of coals

Это указывает на то, что накопление скандия в углях не связано с условиями угленакопления, а обусловлено процессами вторичной его аккумуляции. Его накопление происходит в результате приноса в уже сформировавшийся угольный пласт и концентрирование органическим веществом угля вне зависимости от зольности угля. Минеральное вещество угля выступает в качестве разбавителя, снижая относительное количество скандия в золе угля.

Формы нахождения скандия

Формы нахождения скандия в углях изучены с применением комплекса методов. Согласно последним обобщениям [37, 38], скандий в углях находится преимущественно в органическом веществе и в составе алюмосиликатов. В бурых углях и каменных углях низкой стадии углефикации преобладает органическая форма нахождения скандия

[39]. При этом никаких его собственных минералов в углях не выявлено.

Корреляционный анализ связи скандия с зольностью в углях показал отсутствие таковой. В золах угля установлена высокая значимая отрицательная корреляционная связь содержания Sc с зольностью ($r = -0,68$). Это обстоятельство указывает на незначительную роль в его накоплении кластогенной (внешней) золы и на высокую вероятность его концентрирования в органическом веществе.

При проведении комплексных исследований форм нахождения Sc в аномально обогащенных им углях шести углепроявлений Шаимского района также не было выявлено ни одного собственного минерала скандия. Не отмечено также акцессориев, в которые он обычно входит как сопутствующий элемент в результате изоморфизма. В то же время в золе угля выявлены специфические агрегаты сложного состава, содержащие от 0,6 до 2,5 % Sc (рис. 6).

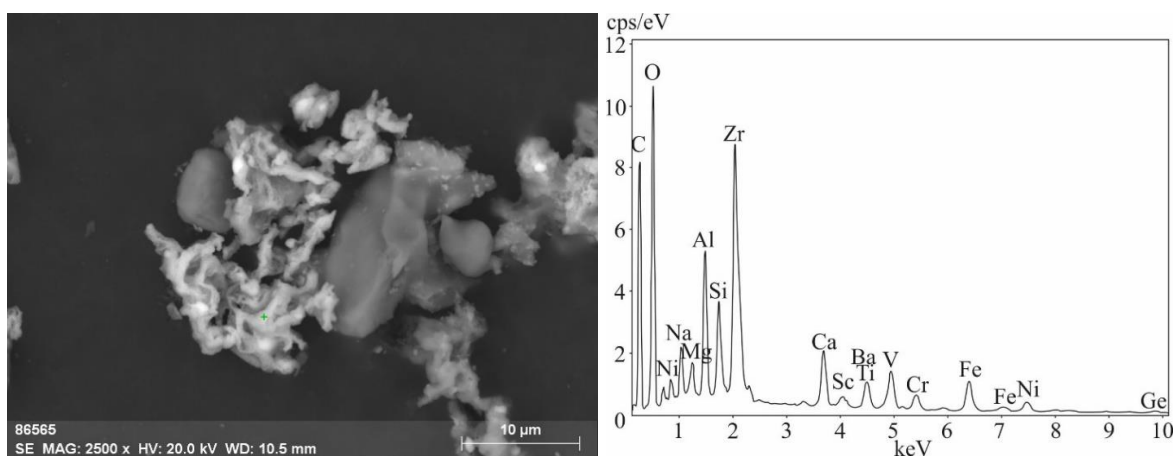


Рис. 6. Скандийсодержащие агрегаты в золе угля. Снимок в обратно-рассеянных электронах и спектр плёнки комплексного состава в золе угля

Fig. 6. Scandium-containing aggregates in coal ash. Backscattered electron image and spectrum of the complex composition film in coal ash

В составе агрегатов помимо Sc отмечено преобладание группы сидерофильных и литофильных элементов, обогащающих скандиеносные угли, в том числе циркония. На данном снимке в спектре помимо 30 % углерода и 33 % кислорода отмечено 14,3 % Zr, 1,1 % Ti, 2,2 % V, 3,1 % Fe, 1,4 % Ni, 0,7 % Cr, 0,47 % Ge и 0,29 % Sc. Очевидно влияние сидерофильной группы на формирование этих металлоносных углей. Повышенное содержание натрия (2,3 %) позволяет предполагать участие содовых вод в формировании этих агрегатов.

Условия формирования скандиеносных углей

Несмотря на довольно высокий кларк скандия [36], аномальные его концентрации в углях – явление достаточно редкое [14, 24]. Причина кроется в особенностях геохимии этого элемента. В условиях зоны гипергенеза Sc ведет себя достаточно инертно. В этом отношении он геохимически близок к РЗЭ иттриевой группы, Al, Zr, Mg, Mn и Ti [40]. Поведение его в зоне гипергенеза обусловлено, с одной стороны, близостью к РЗЭ иттриевой группы, с другой – к магнию и двухвалентному железу [41].

Скандий при образовании кор выветривания ведет себя как малоподвижный элемент. Его вынос из элювия не превышает 30–35 % от исходного содержания в субстрате [42]. В равной степени это касается кор выветривания, развитых по породам кислого, основного, ультраосновного или щелочного состава. Исследование кор выветривания каолинового и латеритного профиля показало незначительный вынос Sc при выветривании даже обогащенных им базитов [43–45]. Специализированная оценка подвижности Sc в системе базальты – природные воды – вторичные отложения в Восточном Забайкалье также свидетельствует о слабой его подвижности на уровне элементов-гидролизатов – РЗЭ, Zr, Hf, Cr и Th [46]. В целом вверх по разрезу коры выветривания содержание скандия обычно возрастает [41, 42, 44, 47]. В этом же направлении увеличивается абсолютное его содержание в глинистой фракции. При выветривании скандий высвобождается из разрушающихся железомagneзиальных минералов (преимущественно пироксенов и амфиболов) и относительно активно сорбируется глинистыми минералами и гидроксидами железа. По этой причине он способен мигрировать в сорбированной форме [42]. Согласно исследованиям латеритной коры выветривания по породам ультраосновного-основного состава в Австралии, основной формой нахождения Sc является его сорбция на гетите [45, 48].

В целом поверхностные и подземные воды зоны гипергенеза отличаются крайне низкими содержаниями Sc – 0,07 мкг/л [49]. Однако в Кузбассе в

ряде случаев установлены его локальные аномалии в подземных водах зоны активного водообмена до 40 мкг/л при среднем значении 8,6 мкг/л [50]. Воды гидрокарбонатные нейтральные или слабощелочные. Более глубокозалегающие воды несколько более щелочные, но также обогащены скандием до 4,1 мкг/л при среднем значении 2,3 мкг/л. Обогащены Sc щелочные (pH>9) содовые воды Чулымо-Енисейского артезианского бассейна (Западная Сибирь) в среднем до 2,4–3,7 мкг/л [51].

Исследование современных торфяников Западной Сибири показало, что содержание Sc в водах закономерно уменьшается в ряду: верховые-переходные-низинные [49]. При этом в этом же порядке увеличивается щелочность от кислых вод верховых торфяников (pH=4,2) до нейтральных – низинных (pH=6,6). В целом отмечено возрастание подвижности скандия в умеренно кислых гидрокарбонатных водах, обогащенных органическим веществом [52]. Согласно этим данным, агрессивная природа этих умеренно кислых грунтовых вод привела к необычным характеристикам их микроэлементного состава с высокими концентрациями в них относительно малоподвижных элементов, таких как Al, Be, тяжелые РЗЭ и Zr. Они также отмечены чрезвычайно высокими концентрациями Fe и Mn до 80 и 4 мг/л соответственно.

Эти примеры показывают, что поведение Sc в водных растворах во многом определяется pH среды и нахождением в них органического вещества. Другой важной особенностью Sc является его высокая комплексообразующая способность [40]. В зоне гипергенеза он наиболее активно мигрирует в форме комплексных сульфатов и бикарбонатов. В условиях щелочной среды при избытке карбонатов или гидрокарбонатов щелочных металлов образуются его комплексы типа $[Sc(CO_3)_n]^{2(n-3)-}$ ($n \geq 2$). Для скандия характерно также образование комплексных карбонатов состава $MSc(CO_3)_2 \cdot nH_2O$ ($M=NH_4, Na, K, Rb, Cs$) [40]. Это хорошо согласуется с повышенным его содержанием в содовых водах. В кислых водах скандий мигрирует в форме органических комплексов и комплексных сульфатов.

В фундаменте Шаимского сводового поднятия преобладают породы основного состава [27]. По ним повсеместно развиты коры выветривания как каолинового, так и, вероятно, латеритного профиля. В настоящее время сохранились реликты коры выветривания до каолинового, а чаще гидрослюдистого профиля [29]. Известно, что базиты в целом существенно обогащены Sc на фоне других типов горных пород. Кларк для магматических пород базитового ряда – 30 г/т, для метабазитов – 33 г/т на фоне кларка для верхней континентальной земной коры в 15 г/т [36] или 7 г/т [53]. Развитие по ним

латеритных кор выветривания часто сопровождается формированием бокситов, обогащенных скандием вплоть до промышленно значимых содержаний [47, 48]. Основной формой концентрирования Sc в латеритах, развитых по породам ультраосновного-основного состава, является его сорбция на гетите (80 %) и изоморфное вхождение в состав гематита (20 %) [48].

Таким образом, на исследуемой территории сочетаются два фактора. С одной стороны, есть источник высокого содержания Sc (породы основного состава). Развивающиеся по ним коры выветривания благоприятны для перехода металла в подвижное состояние, но слабая подвижность Sc в водах ограничивает эту миграцию. При этом скандий относительно хорошо мигрирует в слабощелочных и щелочных содовых водах [51], а также в кислых гидрокарбонатных водах, обогащенных органическим веществом [49, 52]. В связи с этим ранее нами была предложена модель накопления скандия на стадии диагенеза и раннего катагенеза [13]. В этом случае происходит миграция Sc из вмещающих пород, обогащенных им, в подземные воды и его перераспределение с обогащением формирующихся угольных пластов. В поддержку этой модели свидетельствуют факты аномального обогащения скандием контактовых зон угольных пластов. При этом преобладание маломощных пластов благоприятно для их насыщения металлом с формированием металлорганических комплексов. Для мало-

распространенных относительно мощных угольных пластов характерно наличие контактовых зон обогащения, но средневзвешенное по мощности содержание скандия при этом существенно ниже, чем в маломощных пластах. Эти выводы согласуются, в частности, с крайне низкой зольностью многих пластов, нередко <1 %. Такая зольность формируется без участия кластогенной составляющей. Очень низкая зольность углей обусловлена биогенной и, в меньшей степени, сорбционной составляющей. Роль биогенного накопления скандия в углях, по-видимому, ограничена, на что указывает крайне низкое его содержание в современных растениях торфяных болот [54–56]. На гидрогенный механизм накопления Sc указывает и характер распределения близких к скандию по свойствам лантаноидов (рис. 7). Характер распределения здесь имеет типичный H-тип, свойственный водному механизму концентрирования РЗЭ [57]. При этом отсутствие отрицательной и наличие отчетливо выраженной положительной Eu аномалии указывает на преимущественно базитовый состав исходных пород – источника РЗЭ в растворах. О значительной роли водных растворов в формировании редкоземельного спектра углей свидетельствует и индикаторное La/Yb отношение, величина которого в исследуемых скандиеносных углях чрезвычайно мала и редко превышает 5. Для рядовых углей La/Yb равно 11 [35].

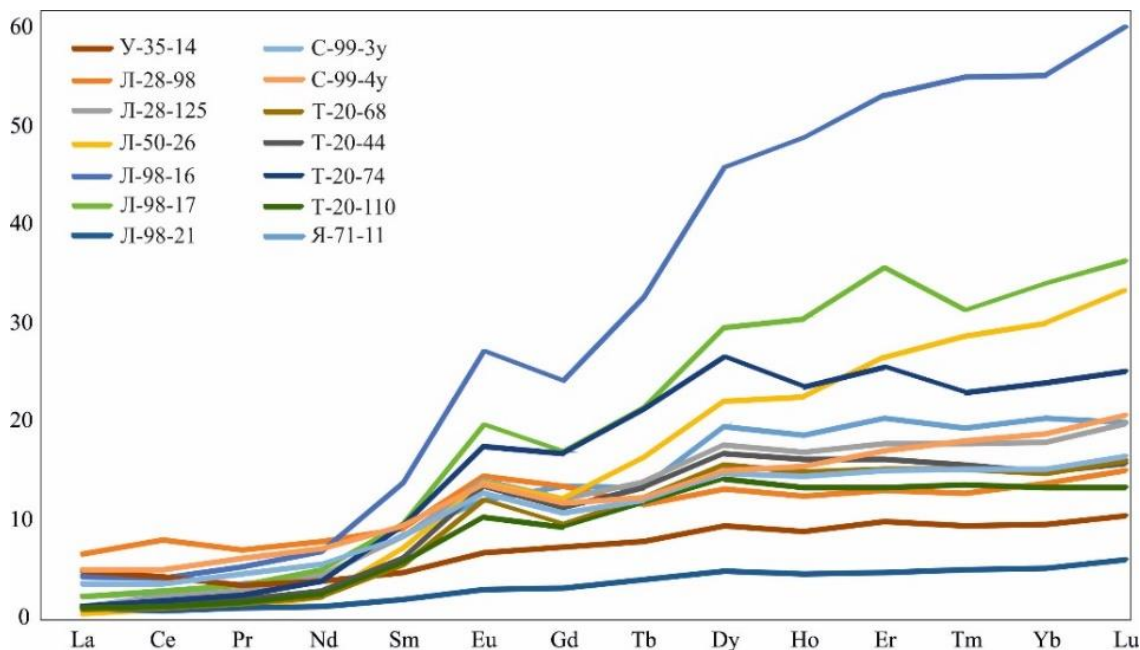


Рис. 7. Нормированные графики распределения РЗЭ в золе скандиеносных углей Шаимского района. Нормировано на кларк в верхней континентальной земной коре по [58]

Fig. 7. UCC-normalized REE patterns in the Sc-bearing coal ash seams of the Shaim region. Upper continental crust (UCC) data from [58]

Обращает на себя внимание необычная ассоциация элементов-примесей в аномально обогащенных скандием углях. Корреляционный анализ показал ассоциацию скандия с группой сидерофильных и халькофильных элементов (Fe, Cr, V, Ni, Cu, As, Sb), отражающую связь его со спецификой источника (породы основного-ультраосновного состава). При этом золы углей аномально обогащены Zr и Hf при наличии высокой корреляционной связи со Sc ($r=0,55$) и группой других литофильных элементов (Be, Ga, Nb, Ge, тяжелые лантаноиды, Th и U). Отсутствие минеральных фаз этих элементов в углях предполагает также гидрогенный механизм их накопления. Их водная миграция в водах зоны гипергенеза и в подземных водах ограничена. Исключения составляют содовые воды угленосных бассейнов. Например, в Кузбассе содержание Zr в водах на глубинах 400–1500 м достигает 880 мкг/л при среднем содержании 293 мкг/л [59]. Специфика состава содовых вод хорошо согласуется с особенностями геохимии скандиеносных углей юго-западной части Западно-Сибирского бассейна и позволяет рассматривать гидрогенную модель их формирования как наиболее обоснованную.

Таким образом, благоприятное сочетание группы факторов, таких как:

- преобладание в области питания бассейна осадконакопления пород базитового состава изначально обогащенных Sc;
- проявление интенсивных процессов выветривания, приведших к формированию мощных кор выветривания и переходу Sc в сорбированное состояние на гидроокислах Fe и глинистых минералах;
- формирование обогащенных органическим веществом содовых вод в угленосных отложениях, обусловивших перевод сорбированной формы Sc в растворимую и его последующую миграцию в угленосной толще;
- наличие многочисленных маломощных пластов и пропластков слабо углефицированного органического вещества в проницаемой песчано-алевролитовой толще, обеспечивших концен-

трирование Sc в форме органических комплексов,

обусловило формирование уникально скандиеносных углей, выявленных в пределах Шаимского района на западе Западно-Сибирской плиты.

Основные выводы

На крайнем западе Западно-Сибирской плиты на границе с Уральской складчатой областью в Шаимском нефтегазоносном районе выявлены уникальные аномально высокие для углей содержания Sc. В перспективе это новый промышленно-генетический тип месторождений скандия. Наряду со Sc золы углей аномально обогащены группой сидерофильных и литофильных металлов, в том числе Zr, Ge, Nb, Y и иттриевыми лантаноидами. Проведенные исследования показали, что формирование уникально скандиеносных углей связано со спецификой состава пород фундамента отложений тюменской свиты, характеризующихся преобладанием пород базит-гипербазитового состава и с развитием по ним кор выветривания в исследуемом районе, обусловившим формирование углевмещающих толщ, изначально обогащенных скандием. В процессе диагенеза и раннего катагенеза в угленосных толщах формировались содовые воды, благоприятствовавшие переходу скандия терригенных отложений и, частично, погребенных кор выветривания, в раствор и перераспределение его в угольные пласты в форме органических соединений. Формы нахождения скандия в углях и характер его распределения в угольных пластах свидетельствуют о гидрогенном механизме формирования аномалий.

Масштабность проявления Sc оруденения на западе Западно-Сибирского бассейна и высокие содержания металла в углях и золах угля позволяют рассматривать его как перспективный промышленно-генетический тип. Ориентируясь на размеры исследованной площади, мощности скандиеносных угольных пластов и пропластков, а также среднее содержание в них металла, можно оценить прогнозные ресурсы Sc в 250 тыс. т.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Seredin V.V., Finkelman R.B. Metalliferous coals: a review of the main genetic and geochemical types // *Int. J. Coal Geol.* – 2008. – Vol. 76. – № 4. – P. 253–289. DOI: 10.1016/j.coal.2008.07.016
2. Coal deposits as promising sources of rare metals for alternative power and energy-efficient technologies / V.V. Seredin, S. Dai, Y. Sun, I.Y. Chekryzhov // *Appl. Geochem.* – 2013. – Vol. 31. – P. 1–11. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2013.01.009.
3. 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. DOI: 10.1016/j.coal.2017.06.005
4. Review of coal as a promising source of lithium / S. Qin, C. Zhao, Y. Li, Y. Zhang // *Int. J. Oil, Gas and Coal Technol.* – 2015. – Vol. 9. – № 2. – P. 215–229.
5. Rudnik E. Review on gallium in coal and coal waste materials: exploring strategies for hydrometallurgical metal recovery // *Molecules.* – 2024. – Vol. 29. – № 24. – 5919. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules29245919>
6. Jaiswal H., Singh A.K. Coal as a non-conventional resource of rare earth elements (REEs) and trace elements: benefits and impacts on environment and human health – a review // *Results in Earth Sciences.* – 2025. – Vol. 3. – 100064. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rines.2025.100064>

7. Geochemical mapping and distribution patterns of critical elements resources in Chinese coal-bearing strata / R.Yan, J. Zhu, Q. Cao, G. Lin, X. Li, F. Xi // *Int. J. of Coal Geology*. – 2025. – Vol. 39. – 10488. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2025.104848>
8. Ескенази Г. Скандий в болгарских углях // *Годишн. Софийск. ун-та. Геол.геогр. фак. Геология*. – 1996. – Т. 89. – Кн. 1. – С. 205–217.
9. Парагенетические ассоциации редкоземельных элементов в мезозойских углях северной части Ленского бассейна / В.А. Каширцев, И.Н. Зуева, В.С. Сукнев, Д.В. Митронов, Ш.А. Сюндюков, Г.В. Андреева, Г.И. Капышева, С.Х. Лившиц, В.И. Попов // *Отечественная геология*. – 1999. – № 4. – С. 65–68.
10. Hower J.C., Ruppert L.F., Williams D.A. Controls on boron and germanium distribution in the low-sulfur Amos coal bed, Western Kentucky coal field. // *Int. J. Coal Geol.* – 2002. – Vol. 51. – P. 27–42. DOI: 10.1016/S0166-5162(02)00151-9
11. Редкометалльный потенциал углей Минусинского бассейна / С.И. Арбузов, В.В. Ершов, Л.П. Рихванов, Т.Ю. Усова, В.В. Кяргин, А.А. Булатов, Н.Е. Дубовик. – Новосибирск: Изд-во СО РАН: филиал “Гео”, 2003. – 347 с.
12. Арбузов С.И., Ершов В.В. Геохимия редких элементов в углях Сибири. – Томск: ИД «Д-Принт», 2007. – 468 с
13. Арбузов С.И. Природа аномальных концентраций скандия в углях // *Известия Томского политехнического университета*. – 2013. – Т. 323. – № 1. – С. 56–64.
14. Scandium (Sc) geochemistry of coals (Siberia, Russian Far East, Mongolia, Kazakhstan, and Iran) / S.I. Arbuzov, A.V. Volostnov, A.M. Mezhibor, V.I. Rybalko, S.S. Ilenok // *Int. J. Coal Geol.* – 2014. – Vol. 125 – P. 22–35. DOI: 10.1016/j.coal.2014.01.008
15. Середин В.В., Арбузов С.И., Алексеев В.П. Скандиеносные угли Яхлинского месторождения, Западная Сибирь // *Доклады РАН*. – 2006. – Т. 409. – № 5. – С. 677–682.
16. Yossifova M.G. Mineral and inorganic chemical composition of the Pernik coal, Bulgaria // *Int. J. Coal Geol.* – 2007. – Vol. 72. – № 3–4. – P. 268–292. DOI: 10.1016/j.coal.2007.03.001
17. Coal ash resources and potential for rare earth element production in the United States / R.C. Reedy, B.R. Scanlon, D.A. Bagdonas, J.C. Hower, D. James, J.R. Kyle, K. Uhlman // *International Journal of Coal Science & Technology*. – 2024. – Vol. 11. – 74. DOI: 10.1007/s40789-024-00710-z
18. Mineralogy, geochemistry and enrichment mechanism of critical elements (Li and Zr-Nb-Hf-Ta-REY) in the coals from western Guizhou Province, China: source and sedimentary environment / Y. Wang, M. Huang, Y. Zhu, Y. Qin, Y. Shi, K. Dou // *Ore Geol. Review*. – 2025. – Vol. 176. – 106402. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2024.106402>
19. Recovery of scandium from various sources: A critical review of the state of the art and future prospects / A.B. Botelho Junior, D.C.R. Espinosa, J. Vaughan, J.A.S. Tenório. // *Minerals Engineering*. – 2021. – Vol. 172. – 107148. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.107148
20. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2022 году». – М., 2023. – 640 с.
21. Западно-Сибирский угольный бассейн / А.З. Юзвickий, А.С. Фомичев, О.И. Бостриков, В.И. Данилов // *Угольная база России. Т. II. Угольные бассейны и месторождения Западной Сибири*. – М.: ООО «Геоинформцентр», 2003. – С. 515–559.
22. Матвеев А.К., Борисов В.С., Железнова Н.Г. Ресурсы углей мира // *Энергетические ресурсы мира: 27-й Международный геологический конгресс*. – М., 4–14 августа 1984. – М.: Наука, 1984. – Т. 2. – С. 10–21.
23. Anomalous gold contents in brown coals and peat in the south-eastern region of the Western-Siberian platform / S.I. Arbuzov, L.P. Rikhsanov, S.G. Maslov, V.S. Arhipov, A.M. Belyaeva // *Int. J. Coal Geol.* – 2006. – Vol. 68. – № 3–4. – P. 127–134. DOI: 10.1016/j.coal.2006.01.004
24. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Ценные элементы-примеси в углях. – Екатеринбург: УрО РАН, 2006. – 538 с.
25. Угленасыщенность, петрографический состав и метаморфизм углей тюменской свиты Шаимского нефтегазоносного района (Западная Сибирь) / В.П. Алексеев, В.И. Русский, Ю.Н. Федоров, Д.Д. Журавлева, Т.Ф. Красковская, Н.В. Пронина, Л.И. Свечников. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2006. – 158 с.
26. Состав и генезис отложений тюменской свиты Шаимского нефтегазоносного района (Западная Сибирь) / В.П. Алексеев, Ю.Н. Федоров, А.В. Маслов, В.И. Русский, М.Ф. Печеркин, М.А. Пудовкина. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2007. – 209 с.
27. История геологического развития и строение фундамента западной части Западно-Сибирского нефтегазоносного мегабассейна / К.С. Иванов, В.А. Коротеев, М.Ф. Печеркин, Ю.Н. Федоров, Ю.В. Ерохин // *Геология и геофизика*. – 2009. – Т. 50. – № 4. – С. 484–501. DOI: 10.1016/j.rgg.2009.03.010
28. Забияка А.И. Эпохи корообразования на юге средней и Западной Сибири // *Золотоносные коры выветривания Сибири*. – Красноярск: КНИИГТИМС, 2002. – С. 18–25.
29. Стратиграфия и палеогеография мезозойско-кайнозойского осадочного чехла Шаимского нефтегазоносного района (Западная Сибирь) / Э.О. Амон, В.П. Алексеев, А.Ф. Глебов, В.А. Савенко, Ю.Н. Федоров. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2010. – 257 с.
30. Геохимическая карта России. Масштаб 1:10000000 / А.А. Смыслов, Л.И. Тихомиров, В.К. Титов, Г.М. Шор. – СПб.: ФГБУ ВСЕГЕИ, 1995.
31. Минерально-петрографическая характеристика песчаников тюменской свиты Шаимского нефтегазоносного района / В.И. Русский, В.П. Алексеев, Л.И. Свечников, А.Ф. Хакимов // *Геология угольных месторождений. Межвуз. Научн. Тем. Сборник. Вып.14*. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2004. – С. 163–172.
32. Маслов А.В., Алексеев В.П. Особенности химического состава и РЗЭ-Th-Sc – систематика тонкозернистых терригенных пород нижнего мезозоя Шаимского нефтегазоносного района (Западная Сибирь) // *Известия вузов. Геология и разведка*. – 2007. – № 2. – С. 21–30.
33. Систематика редкоземельных элементов и элементов платиновой группы в тонкозернистых терригенных породах средней и верхней юры Шаимского нефтегазоносного района (Западная Сибирь) / А.В. Маслов, Ю.Н. Федоров, Ю.Л. Ронкин, В.П. Алексеев, О.П. Лепихина, Г.А. Лепихина // *Литосфера*. – 2010. – № 2. – С. 3–24.

34. Кизильштейн Л.Я., Левченко С.В., Перетятко А.Г. Формирование газовой фазы элементов-примесей при сжигании углей на ТЭС // *Химия твердого топлива*. – 1990. – № 6. – С. 136–139.
35. Ketris M.P., Yudovich Ya.E. Estimations of Clarkes for carbonaceous biolithes: world averages for trace element contents in black shales and coals // *Int. J. Coal. Geol.* – 2009. – Vol. 78. – № 2. – P. 135–148. DOI: 10.1016/j.coal.2009.01.002
36. Григорьев Н.А. Среднее содержание химических элементов в горных породах, слагающих верхнюю часть континентальной коры // *Геохимия*. – 2003. – № 7. – С. 785–795.
37. Modes of occurrence of elements in coal: a critical evaluation / S. Dai, R.B. Finkelman, D. French, J.C. Hower, I.T. Graham, F. Zhao // *Earth-Science Reviews*. – 2021. – Vol. 222. – 103815. DOI: 10.1016/j.earscirev.2021.103815
38. Inorganic geochemistry of coal / S. Dai, R.B. Finkelman, J.C. Hower, D. French, I.T. Graham, F. Zhao. – Elsevier, 2023. – 438 p. DOI: 10.1016/C2021-0-02977-1
39. Arbuzov S.I., Maslov S.G., Il'enok S.S. Modes of occurrence of scandium in coals and peats (a review) // *Solid Fuel Chemistry*. – 2015. – Vol. 49. – № 3. – P. 167–182. DOI: 10.3103/S0361521915030027
40. Комиссарова Л.Н. Неорганическая и аналитическая химия скандия. – М.: Эдиториал УРСС, 2006. – 512 с.
41. Янин Е.П. Скандий в окружающей среде (распространенность, техногенные источники, вторичные ресурсы) // *Проблемы окружающей среды и природных ресурсов*. – 2007. – № 8. – С. 70–90.
42. Борисенко Л.Ф. Скандий // *Геологический справочник по сидерофильным и халькофильным редким металлам*. – М.: Недра, 1989. – С. 42–86.
43. Поведение железа, марганца, кобальта, скандия в корях выветривания габброидов и амфиболитов некоторых районов Западного Узбекистана / А.А. Колдаев, Н.В. Котов, И.А. Самойлов, И.И. Орестова // *Поведение рудогенных элементов в опорных профилях выветривания: сб. научн. тр.* – Новосибирск: СО РАН, Ин-т геологии и геофизики, 1982. – С. 68–73.
44. Scandium enrichment in the weathering crust of Emeishan basalt, Dali: geochemical abundance, occurrence states, and pre-concentration potential / X. Wang, R. Yang, W. Cheng, R. Chen, J. Chen, X. Li // *Minerals Engineering*. – 2025. – Vol. 233. – 109679. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2025.109679>
45. Australian laterites reveal mechanisms governing scandium dynamics in the critical zone / M. Chasse, W.L. Griffin, S.Y. O'Reilly, G. Calas // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2019. – Vol. 260. – P. 292–310. DOI: 10.1016/j.gca.2019.06.036
46. Дребот В.В., Лепокурова О.Е. Оценка подвижности химических элементов в системе базальты – природные воды – вторичные отложения территории Торейских озер (Восточное Забайкалье) // *Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: сб. матер. четвертой Всероссийской научн. конф. с междунар. участием*. – Улан-Удэ: Геологический институт СО РАН, 2020. – С. 335–338.
47. Руденко А.А., Трошина И.Д., Данилов А.А. Опыт получения скандиевого концентрата из материала коры выветривания // *Разведка и охрана недр*. – 2019. – № 6. – С. 46–50.
48. Scandium speciation in a world-class lateritic deposit / M. Chasse, W.L. Griffin, S.Y. O'Reilly, G. Calas // *Geochem. Persp. Let.* – 2017. – Vol. 3. – P. 105–114. DOI: 10.7185/geochemlet.1711
49. Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода – порода. Т. 2. Система вода – порода в условиях зоны гипергенеза / С.Л. Шварцев, Б.Н. Рыженко, В.А. Алексеев, Е.М. Дутова, И.А. Кондратьева, Ю.Г. Копылова, О.Е. Лепокурова. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. – 389 с.
50. Лепокурова О.Е., Домрочева Е.В. Элементный состав природных вод и вмещающих отложений Кузбасса с оценкой водной миграции (на примере Нарыкско-Осташкинской площади). // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 2. – С. 200–213. DOI: 10.18799/24131830/2021/2/3056
51. Лепокурова О.Е., Шварцев С.Л. Геохимические особенности содовых вод Чулымо-Енисейского артезианского бассейна (Западная Сибирь) // *Геология и геофизика*. – 2019. – Т. 60. – № 5. – С. 718–731. DOI: 10.15372/GiG2019044
52. Rare earth element contents of high pCO₂ groundwaters of Primorye, Russia: mineral stability and complexation controls / P. Shand, K.H. Johannesson, O. Chudaev, V. Chudaeva, W.M. Edmunds // *Rare Earth Elements in Groundwater Flow System* / Ed. by K.H. Johannesson. – The Netherlands: Springer, 2006. – P. 161–186. DOI: 10.1007/1-4020-3234-X_7
53. Wedepohl K.H. The composition of the continental crust // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1995. – Vol. 59. – № 7. – P. 1217–1232. DOI: 10.1016/0016-7037(95)00038-2
54. Тюремнов С.Н. Торфяные месторождения. – М.: Недра, 1976. – 488 с.
55. The accumulation of the rare earth elements and of scandium in successive needle age classes of Norway spruce / A. Wyttenbach, P. Schleppei, J. Bucher, V. Furrer, L. Tobler // *Biol Trace Elem Res.* – 1994. – Vol. 41. – № 1–2. – P. 13–29. DOI: 10.1007/BF02917214
56. Геохимия торфяных болот таежной зоны Западной Сибири / В.С. Архипов, С.Г. Маслов, С.И. Арбузов, А.Ю. Иванов. – Новосибирск: СО РАН, 2022. – 210 с.
57. 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. DOI: 10.1016/j.coal.2011.11.001
58. Taylor S.R., McLennan S.M. The continental crust: its composition and evolution. – Oxford, Blackwell Scientific Publ., 1985. – 312 p.
59. Лепокурова О.Е., Трифонов Н.С., Домрочева Е.В. Миграционные формы основных ионов в подземных водах угленосных отложений Кузбасса с акцентом на соединения с гумусовыми кислотами (по результатам моделирования) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333. – № 3. – С. 76–89.

Информация об авторах

Сергей Иванович Арбузов, доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; ведущий научный сотрудник, Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Россия, 690022, г. Владивосток, пр. 100-летия Владивостока, 159; Siarbuzov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6378-4103>

Сергей Сергеевич Ильенок, кандидат геолого-минералогических наук, старший преподаватель отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. ilenokss@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0216-4485>

Андрей Сергеевич Торопов, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник химического факультета, Московский государственный университет, Россия, 119234, г. Москва, ул. Ленинские горы, 1. torop990@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7759-2831>

Алексей Сергеевич Холодов, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Россия, 690022, г. Владивосток, пр. 100-летия Владивостока, 159. alex.holodov@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-6916-0596>

Поступила в редакцию: 04.08.2025

Поступила после рецензирования: 12.08.2025

Принята к публикации: 04.09.2025

REFERENCES

1. Seredin V.V., Finkelman R.B. Metalliferous coals: a review of the main genetic and geochemical types. *Int. J. Coal Geol.*, 2008, vol. 76, no. 4, pp. 253–289. DOI: 10.1016/j.coal.2008.07.016
2. Seredin V.V., Dai S., Sun Y., Chekryzhov I.Y. Coal deposits as promising sources of rare metals for alternative power and energy-efficient technologies. *Appl. Geochem.*, 2013, vol. 31, pp. 1–11. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2013.01.009.
3. Dai S., Finkelman R.B. Coal as a promising source of critical elements: progress and future prospects. *Int. J. Coal Geol.*, 2018, vol. 186, pp. 155–164. DOI: 10.1016/j.coal.2017.06.005
4. 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, no. 2, pp. 215–229.
5. Rudnik E. Review on gallium in coal and coal waste materials: exploring strategies for hydrometallurgical metal recovery. *Molecules*, 2024, vol. 29, no. 24, 5919. DOI; <https://doi.org/10.3390/molecules29245919>
6. Jaiswal H., Singh A.K. Coal as a non-conventional resource of rare earth elements (REEs) and trace elements: benefits and impacts on environment and human health – a review. *Results in Earth Sciences*, 2025, vol. 3, 100064. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rines.2025.100064>
7. Yan R., Zhu J., Cao Q., Lin G., Li X., Xi F. Geochemical mapping and distribution patterns of critical elements resources in Chinese coal-bearing strata. *Int. J. of Coal Geol.*, 2025, vol. 39, 10488. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2025.10488>
8. Eskenazy G. Scandium in Bulgarian coals. *Godishn. Sofia Univ. Geol. geogr. faculty. Geology*, 1996, vol. 89, no. 1, pp. 205–217. (In Russ.)
9. Kashirtsev V.A., Zueva I.N., Suknev V.S., Mitronov D.V., Syundyukov Sh.A., Andreeva G.V., Kapysheva G.I., Livshits S.H., Popov V.I. Paragenetic associations of rare earth elements in Mesozoic coals of the northern part of the Lena Basin. *Otechestvennaya Geologiya*, 1999, no. 4, pp. 65–68. (In Russ.)
10. Hower J.C., Ruppert L.F., Williams D.A. Controls on boron and germanium distribution in the low-sulfur Amos coal bed, Western Kentucky coal field. *Int. J. Coal Geol.*, 2002, vol. 51, pp. 27–42. DOI: 10.1016/S0166-5162(02)00151-9
11. Arbuzov S.I., Ershov V.V., Rikhvanov L.P., Usova T.Y., Kyargin V.V., Bulatov A.A., Dubovik N.E. *Rare-metal potential of coals of the Minusinsk basin*. Novosibirsk, SB RAS Publishers, branch “Geo”, 2003. 347 p. (In Russ.)
12. Arbuzov S.I., Ershov V.V. *Geochemistry of rare elements in Siberian coals*. Tomsk, House D-Print Publ., 2007. 468 p. (In Russ.)
13. Arbuzov S.I. The nature of anomalous concentrations of scandium in coal. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 1, pp. 56–64. (In Russ.)
14. 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). *Int. J. Coal Geol.*, 2014, vol. 125, pp. 22–35. DOI: 10.1016/j.coal.2014.01.008
15. Seredin V.V., Arbuzov S.I., Alekseyev V.P. Scandium-bearing coals of the Yakhlinkoye deposit, Western Siberia. *Doklady of the Russian Academy of Sciences*, 2006, vol. 409, no. 5, pp. 677–682.
16. Yossifova M.G. Mineral and inorganic chemical composition of the Pernik coal, Bulgaria. *Int. J. Coal Geol.*, 2007, vol. 72, no. 3–4, pp. 268–292. DOI: 10.1016/j.coal.2007.03.001
17. Reedy R.C., Scanlon B.R., Bagdonas D.A., Hower J.C., James D., Kyle J.R., Uhlman K. Coal ash resources and potential for rare earth element production in the United States. *Int. J. of Coal Science & Technology*, 2024, vol. 11, 74. DOI: 10.1007/s40789-024-00710-z
18. Wang Y., Huang M., Zhu Y., Qin Y., Shi Y., Dou K. Mineralogy, geochemistry and enrichment mechanism of critical elements (Li and Zr-Nb-Hf-Ta-REY) in the coals from western Guizhou Province, China: source and sedimentary environment. *Ore Geol. Review*, 2025, vol. 176, 106402. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2024.106402>
19. Botelho Junior A.B., Espinosa D.C.R., Vaughan J., Tenório J.A.S. Recovery of scandium from various sources: A critical review of the state of the art and future prospects. *Minerals Engineering*, 2021, vol. 172, 107148. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.107148
20. *State Report “On the State and Utilization of Mineral and Raw Material Resources of the Russian Federation in 2022”*. Moscow, 2023. 640 p. (In Russ.)
21. Yuzvitsky A.Z., Fomichev A.S., Bostrikov O.I., Danilov V.I. West Siberian coal basin. *Coal Base of Russia. Vol. II. Coal basins and deposits of Western Siberia*. Moscow, Geoinformcenter Publ., 2003. pp. 515–559. (In Russ.)
22. Matveev A.K., Borisov V.S., Zheleznova N.G. Coal resources of the world. *Energy Resources of the World. 27th International Geological Congress*. Moscow, 4–14 August 1984. Moscow, Nauka Publ., 1984. Vol. 2, pp. 10–21. (In Russ.)
23. 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, no. 3–4, pp. 127–134. DOI: 10.1016/j.coal.2006.01.004
24. Yudovich Y.E., Ketris M.P. *Valuable trace elements in coals*. Yekaterinburg, Ural Branch of RAS Publ., 2006. 538 p. (In Russ.)

25. Alekseyev V.P., Russky V.I., Fedorov Y.N., Zhuravleva D.D., Kraskovskaya T.F., Pronina N.V., Svechnikov L.I. *Coal saturation, petrographic composition and metamorphism of coals of the Tyumen Formation of the Shaim oil and gas bearing area (Western Siberia)*. Yekaterinburg, Ural State Mining University Publ. House, 2006. 158 p. (In Russ.)
26. Alekseyev V.P., Fedorov Yu.N., Maslov A.V., Russky V.I., Pecherkin M.F.F., Pudovkina M.A. *Composition and genesis of sediments of the Tyumen Formation of the Shaim oil and gas bearing area (Western Siberia)*. Yekaterinburg, Ural State Mining University Publ. House, 2007. 209 p. (In Russ.)
27. Ivanov K.S., Koroteev V.A., Erokhin Yu.V., Pecherkin M.F., Fedorov Yu.N. The Western part of the West Siberian petroleum megabasin: geologic history and structure of the basement. *Russian Geology and Geophysics*, 2009, vol. 50, no. 4, pp. 365–379. DOI: 10.1016/j.rgg.2009.03.010
28. Zabiyaka A.I. Epochs of crust formation in the south of Middle and Western Siberia. *Gold-bearing weathering crusts of Siberia*. Krasnoyarsk, KNIIGGIMS Publ., 2002. pp. 18–25. (In Russ.)
29. Amon E.O., Alekseyev V.P., Glebov A.F., Savenko V.A., Fedorov Yu.N. *Stratigraphy and paleogeography of the Mesozoic-Cenozoic sedimentary cover of the Shaim oil and gas bearing area (Western Siberia)*. Yekaterinburg, Ural State Mining University Publ. House, 2010. 257 p. (In Russ.)
30. Smyslov A.A., Tikhomirov L.I., Titov V.K., Shor G.M. *Geochemical map of Russia. Scale 1:10000000*. St Petersburg, VSEGEI Publ., 1995. (In Russ.)
31. Russky V.I., Alekseev V.P., Svechnikov L.I., Khakimov A.F. Mineral and petrographic characterization of sandstones of the Tyumen Formation of the Shaim oil and gas bearing area. *Geology of coal deposits. Interuniversity scientific topic collection*. Yekaterinburg, Ural State Mining University Publ. House, 2004. pp. 163–172. (In Russ.)
32. Maslov A.V., Alekseyev V.P. Peculiarities of chemical composition and TR-Th-Sc-systematization of fine-grained terrigenous rocks of lower Mesozoic in Shaimsk oil-and-gas-bearing region (West Siberia). *Proc. of higher educational establishments. Geology and Exploration*, 2007, no. 2, pp. 21–30. (In Russ.)
33. Maslov A.V., Fedorov Y.N., Ronkin Y.L., Alekseyev V.P., Lepikhina O.P., Lepikhina G.A. Systematics of rare earth elements and platinum group elements in fine-grained terrigenous rocks of the middle and upper Jurassic of the Shaim oil and gas bearing area (Western Siberia). *Lithosphere*, 2010, no. 2, pp. 3–24. (In Russ.)
34. Kizilstein L.Ya., Levchenko S.V., Peretyatko A.G. Formation of the gas phase of trace elements during coal combustion at TPPs. *Solid Fuel Chemistry*, 1990, no. 6, pp. 136–139. (In Russ.)
35. Ketris M.P., Yudovich Ya.E. Estimations of Clarkes for carbonaceous biolithes: world averages for trace element contents in black shales and coals. *Int. J. Coal. Geol.*, 2009, vol. 78, no. 2, pp. 135–148. DOI: 10.1016/j.coal.2009.01.002
36. Grigoriev N.A. Average content of chemical elements in rocks composing the upper part of the continental crust. *Geochemistry*, 2003, no. 7, pp. 785–795. (In Russ.)
37. Dai S., Finkelman R.B., French D., Hower J.C., Graham I.T., Zhao F. Modes of occurrence of elements in coal: a critical evaluation. *Earth-Science Reviews*, 2021, vol. 222, 103815. DOI: 10.1016/j.earscirev.2021.103815
38. Dai S., Finkelman R.B., Hower J.C., French D., Graham I.T., Zhao F. *Inorganic geochemistry of coal*. Elsevier, 2023. 438 p. DOI: 10.1016/C2021-0-02977-1
39. Arbuzov S.I., Maslov S.G., Il'enok S.S. Modes of occurrence of scandium in coals and peats (a review). *Solid Fuel Chemistry*, 2015. vol. 49, no. 3, pp. 167–182. DOI: 10.3103/S0361521915030027
40. Komissarova L.N. *Inorganic and analytical chemistry of scandium*. Moscow, Editorial Urss, 2006. 512 p. (In Russ.)
41. Yanin E.P. Scandium in the environment (prevalence, anthropogenic sources, secondary resources). *Problems of Environment and Natural Resources*, 2007, no. 8, p. 70–90. (In Russ.)
42. Borisenko L.F. Scandium. *Geological reference book on siderophilic and chalcophilic rare metals*. Moscow, Nedra Publ., 1989. pp. 42–86.
43. Koldaev A.A., Kotov N.V., Samoilov I.A., Orestova I.I. Behavior of iron, manganese, cobalt scandium in weathering crusts of gabbroids and amphibolites of some areas of Western Uzbekistan. *Collection of scientific papers. Behavior of ore-bearing elements in reference weathering profiles*. Novosibirsk, Siberian Branch of RAS, Institute of Geology and Geophysics Publ., 1982. pp. 68–73. (In Russ.)
44. Wang X., Yang R., Cheng W., Chen R., Chen J., Li X. Scandium enrichment in the weathering crust of Emeishan basalt, Dali: geochemical abundance, occurrence states, and pre-concentration potential. *Minerals Engineering*, 2025, vol. 233, 109679. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2025.109679>
45. Chasse M., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Calas G. Australian laterites reveal mechanisms governing scandium dynamics in the critical zone. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2019, vol. 260, pp. 292–310. DOI: 10.1016/j.gca.2019.06.036
46. Drebot V.V., Lepokurova O.E. Assessment of the mobility of chemical elements in the system basalts – natural waters – secondary sediments of the Torey Lakes territory (Eastern Transbaikal). *Geological evolution of water interaction with rocks. Proceedings of the Fourth All-Russian scientific conference with international participation*. Ulan-Ude, Geological Institute of SB RAS Publ., 2020. pp. 335–338.
47. Rudenko A.A., Troshina I.D., Danilov A.A. Experience in obtaining scandium concentrate from weathering crust material. *Exploration and protection of mineral resources*, 2019, no. 6, pp. 46–50. (In Russ.)
48. Chasse M., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Calas G. Scandium speciation in a world-class lateritic deposit. *Geochem. Persp. Lett.*, 2017, vol. 3, pp. 105–114. DOI: 10.7185/geochemlet.1711
49. Shvartsev S.L., Ryzhenko B.N., Alekseyev V.A., Dutova E.M., Kondratieva I.A., Kopylova Yu.M., Kondratieva I.A., Kopylova Y.G., Lepokurova O.E. *Geological evolution and self-organization of water-rock system. Vol. 2. Water-rock system in the conditions of hypergenesis zone*. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2007. 389 p. (In Russ.)
50. Lepokurova O.E., Domrocheva E.V. Elemental composition of natural waters and host sediments of the Kuzbass with an assessment of water migration (on the example of the Naryk-Ostashkin area). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 2, pp. 200–213. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2021/2/3056

51. Lepokurova O.E., Shvartsev S.L. Geochemistry of soda waters of the Chulym–Yenisei artesian basin (West Siberia). *Russian Geology and Geophysics*, 2019, vol. 60, no. 5, pp. 558–569. DOI: 10.15372/GiG2019044
52. Shand P., Johannesson K.H., Chudaev O., Chudaeva V., Edmunds W.M. Rare earth element contents of high pCO₂ groundwaters of Primorye, Russia: mineral stability and complexation controls. *Rare Earth Elements in Groundwater Flow System*. The Netherlands, Springer, 2006. pp. 161–186. DOI: 10.1007/1-4020-3234-X_7
53. Wedepohl K.H. The composition of the continental crust. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 1995, vol. 59, no. 7, pp. 1217–1232. DOI: 10.1016/0016-7037(95)00038-2
54. Tyuremnov S.N. *Peat deposits*. Moscow, Nedra Publ., 1976. 488 p. (In Russ.)
55. Wyttenbach A., Schleppi P., Bucher J., Furrer V., Tobler L. The accumulation of the rare earth elements and of scandium in successive needle age classes of Norway spruce. *Biol. Trace Elem. Res.*, 1994, vol. 41, no. 1–2, pp. 13–29. DOI: 10.1007/BF02917214
56. Arkhipov V.S., Maslov S.G., Arbuzov S.I., Ivanov A.Yu. *Geochemistry of peat bogs of the taiga zone of Western Siberia*. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2022. 210 p. (In Russ.)
57. Seredin V.V., Dai S. Coal deposits as potential alternative sources for lanthanides and yttrium. *Int. J. Coal Geol.*, 2012, vol. 94, pp. 67–93. DOI: 10.1016/j.coal.2011.11.001
58. Taylor S.R., McLennan S.M. *The continental crust: its composition and evolution*. Oxford, Blackwell Scientific Publ., 1985. 312 p.
59. Lepokurova O.E., Trifonov N.S., Domrocheva E.V. Migration forms of basic ions in groundwater of coal-bearing sediments of Kuzbass with a focus on compounds with humic acids (by simulation results). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 3, pp. 76–89. DOI: 10.18799/24131830/2022/3/3464

Information about the authors

Sergey I. Arbuzov, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; Leading Researcher, Far East Geological Institute FEB RAS, 159, 100 Letiya Vladivostoka avenue, Vladivostok, 690022, Russian Federation. Siarbuzov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6378-4103>

Sergey S. Ilenok, Cand. Sc., Senior Lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. ilenokss@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0216-4485>

Andrey S. Toropov, Cand. Sc., Researcher, Moscow State University, 1, Leninskie Gory street, Moscow, 119234, Russian Federation. torop990@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7759-2831>

Alexey S. Kholodov, Cand. Sc., Senior Researcher, Far East Geological Institute FEB RAS, 159, 100 Letiya Vladivostoka avenue, Vladivostok, 690022, Russian Federation. alex.holodov@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-6916-0596>

Received: 04.08.2025

Revised: 12.08.2025

Accepted: 04.09.2025