

СКАНДИЙ В УГЛЯХ СЕВЕРНОЙ АЗИИ
(*Сибирь, российский Дальний Восток, Монголия, Казахстан*)

С.И. Арбузов, А.В. Волостнов, В.С. Машенькин*, А.М. Межибор

Томский политехнический университет, 634050, Томск, просп. Ленина, 30, Россия

** Чингис Хаан Банк, г. Улаанбаатар, просп. Чингиса, 15, Монголия*

Приведены оригинальные новые данные по геохимии скандия в углях азиатской части России, Монголии и Казахстана. Изученные угли в целом обогащены Sc по сравнению со средними оценками для углей мира. В различных регионах изученной территории установлены угольные месторождения, аномально обогащенные Sc вплоть до промышленно значимых концентраций. Выявлены факторы накопления Sc в углях. Концентрации скандия в углях зависят от петрофонда угольных бассейнов (состава горных пород их обрамления) и фациальных условий угленакопления.

В процессе угольного метаморфизма установлено перераспределение и частичный вынос скандия из угольного пласта. Особенности распределения скандия в месторождениях и угольных пластах указывают на преимущественно гидрогенный механизм накопления аномальных его концентраций в углях и торфах. Предполагается, что накопление скандия в углях и торфах обусловлено его выщелачиванием из углевмещающих пород и переотложением в угольный (торфяной) пласт с участием грунтовых и подземных вод, обогащенных органическими кислотами. Для накопления в углях высоких концентраций скандия необходимы условия для формирования обогащенных скандием углевмещающих пород и условия для его выщелачивания и транспортировки в угольный пласт. Такие условия реализуются в современных болотных системах Западной Сибири и могли реализоваться в древних бассейнах торфо(угле)накопления.

Уголь, металлоносность, геохимия, скандий, факторы накопления.

SCANDIUM IN THE COALS OF NORTHERN ASIA
(*Siberia, the Russian Far East, Mongolia, and Kazakhstan*)

S.I. Arbuzov, A.V. Volostnov, V.S. Mashen'kin, and A.M. Mezhibor

We present new original data on the geochemistry of scandium in the coals of Asian Russia, Mongolia, and Kazakhstan. In general, the studied coals are enriched in Sc as compared with the average coals worldwide. Coal deposits with abnormally high, up to commercial, Sc contents were detected in different parts of the study area. The factors for the accumulation of Sc in coals have been identified. The Sc contents of the coals depend on the petrologic composition of coal basins (composition of rocks in their framing) and the facies conditions of coal accumulation.

We have established the redistribution and partial removal of Sc from a coal seam during coal metamorphism. The distribution of Sc in deposits and coal seams indicates the predominantly hydrogenic mechanism of its anomalous concentration in coals and peats. The accumulation of Sc in the coals and peats is attributed to its leaching out of the coal-bearing rocks and redeposition in a coal (peat) layer with groundwater and undergroundwater enriched in organic acids. The enrichment of coals with Sc requires conditions for the formation of Sc-enriched coal-bearing rocks and conditions for its leaching and transport to the coal seam. Such conditions can be found in the present-day peatland systems of West Siberia and, probably, in ancient basins of peat (coal) accumulation.

Coal, metal-bearing capacity, geochemistry, scandium, accumulation factors

ВВЕДЕНИЕ

Проведенные за последние несколько десятилетий массовые исследования элементов-примесей в угольных месторождениях и бассейнах на всех континентах показали, что угли являются концентратами многих ценных металлов, в том числе редких и рассеянных. 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 геохимические аномалии в зонах углей вплоть до промышленно значимых концентраций [Валиев и др., 1993; Каширцев и др., 1999; Арбузов и др., 2003, 2007; Середин и др., 2006; Юдович, Кетрис, 2006; Seredin, Finkelman, 2008].

Несмотря на довольно большой объем информации о содержании скандия в углях, геохимия его изучена недостаточно. Наиболее полное обобщение по геохимии этого элемента дано в работах Я.Э. Юдовича и М.П. Кетрис [Юдович, Кетрис, 2002, 2006]. Работ, непосредственно посвященных скандию в углях, насчитываются единицы [Swaine, 1964; Гордон и др., 1968; Гурен и др., 1968; Менковский и др., 1968; Юровский, 1968; Борисова и др., 1974; Ескенази, 1996; Арбузов и др., 1996, 1997, 2000, 2003; Крюкова и др., 2001; Юдович, Кетрис, 2002, 2006; Середин и др., 2006; Арбузов, Ершов, 2007], да и в них рассмотрены лишь отдельные частные вопросы его геохимии. В настоящее время нет отчетливого представления о причинах и условиях накопления высоких концентраций скандия в углях. Как следствие, не разработаны критерии поисков скандиеносных углей. Причины этого кроются в отсутствии интереса у промышленности к углям как к источнику скандиевого сырья. Низкий спрос на этот элемент, во многом обусловленный его чрезвычайно высокой ценой, вполне обеспечивается имеющимися мощностями и не стимулирует изучение других источников сырья. А вместе с тем золы некоторых углей, благодаря их доступности и высоким концентрациям металла, вполне могли бы конкурировать с традиционными источниками скандия.

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование геохимии скандия в углях выполнено на территории азиатской части Российской Федерации, Монголии и Казахстана (рис. 1). Выбор объектов изучения определялся задачами исследований, включающими не только оценку содержания скандия в углях, но и изучение закономерностей накопления в них аномальных концентраций металлов, влияния различных факторов геологической среды на уровни накопления Sc в углях и золах углей, условий его концентрирования и форм нахождения в углях разной степени метаморфизма.

В Сибири изучено 9 угольных бассейнов и 14 самостоятельных месторождений. Сибирский регион представлен углями всех марок от лигнитов до антрацитов широкого возрастного диапазона от девона до палеогена. В четырех бассейнах: Кузнецком, Минусинском, Иркутском и Канско-Ачинском выполнены детальные геолого-геохимические исследования. В меньшей степени изучены Горловский, Тунгусский, Западно-Сибирский, Улугхемский и Таймырский бассейны, но и они охарактеризованы достаточно представительными материалами. Здесь также установлены развитые по углям контактово-метаморфические графитовые породы. Общее число изученных проб угля в Сибирском регионе составляет 3285, торфа — 1927, всего 5212 проб.

Дальний Восток России исследован менее детально. Здесь распространены угли позднеюрского, мелового, палеогенового и неогенового возрастов. Для него характерна существенная роль вулканизма в формировании угленосных отложений. Многочисленные месторождения и бассейны Дальнего Востока России исследованы еще недостаточно и полученные в настоящее время выводы носят предварительный характер. Часть данных получена при изучении коллекций проб угля, предоставленных для исследований В.В. Ивановым, А.А. Кумарьковым, М.А. Климиным, В.Н. Швецом и В.А. Мелким. Угли этого региона представлены 291 пробой из 13 месторождений.

Впервые представительные геохимические исследования выполнены на территории Монголии. Всего изучено 18 месторождений карбонового, пермского, юрского и мелового возрастов, которые представлены 327 пробами угля. Особенность угольных месторождений Монголии — большой возрастной диапазон углеобразования от раннего карбона до мела.

Небольшой массив данных получен по угленосным отложениям Казахстана. Они представлены углями и углевмещающими породами Экибастузского и Карагандинского бассейнов карбонового возраста, Майкубенского бассейна и месторождения Каражыра юрского возраста. Коллекция проб из месторождений Казахстана предоставлена С.Ю. Калининой, А.Я. Пшеничкиным и С.В. Азаровой.

В исследуемой коллекции проб по территории Сибири, российского Дальнего Востока, Казахстана и Монголии представлены основные типы углей, образовавшихся в различных геотектонических режимах и фациальных обстановках. Марочный состав изменяется от незрелых бурых углей до антрацитов. Возрастной диапазон варьирует от девона до неогена. Кроме того, для сравнения изучены также современные торфяники Западной Сибири.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Основой для написания статьи являются результаты количественного определения скандия в 5891 пробе угля и торфа и более 2000 пробах углевмещающих пород различных месторождений. Опробование угольных пластов выполнялось бороздвым методом с дифференцированным отбором проб на угледобывающих предприятиях в разрезах и шахтах, в естественных обнажениях, а также по керну скважин. Длина интервала опробования выбиралась в зависимости от мощности и сложности строения пласта и изменялась в среднем от 0.15 до 2.0 м. В отдельных сечениях выполнялась детализация разреза

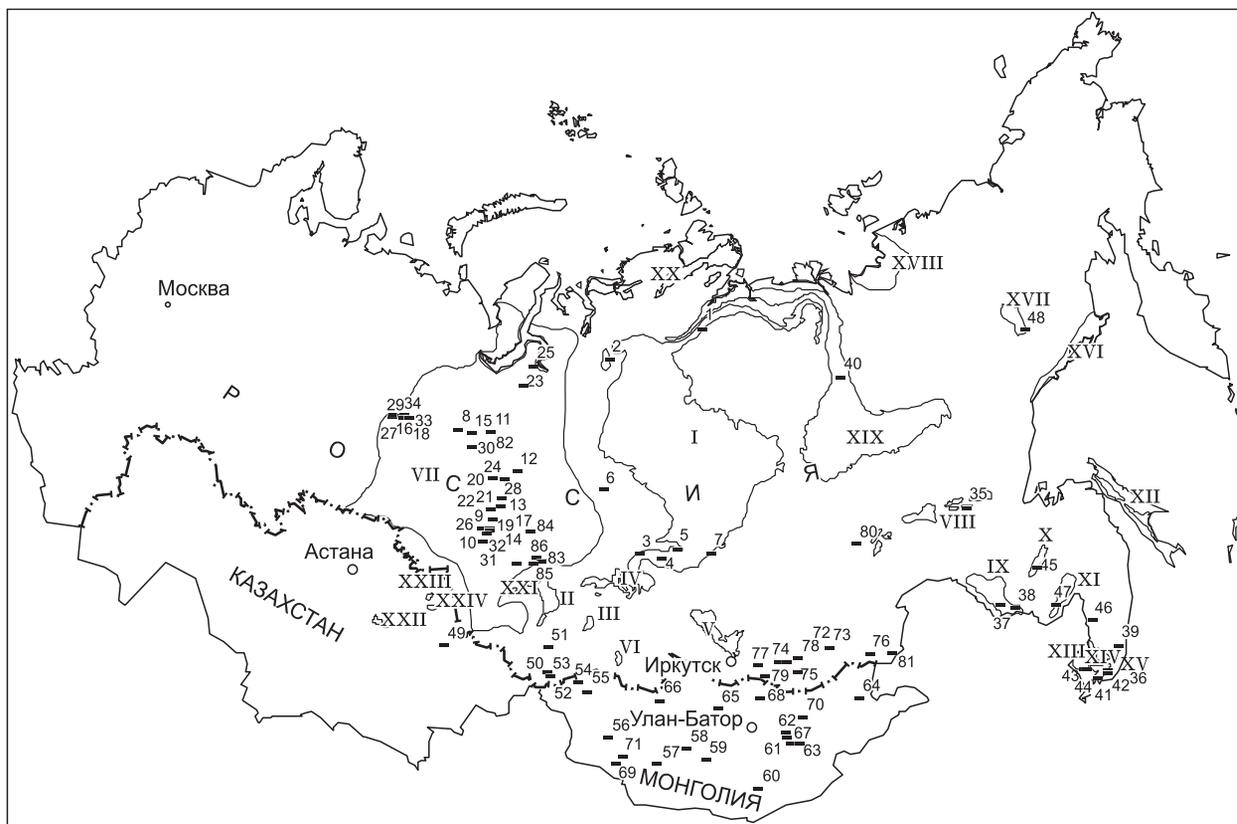


Рис. 1. Размещение изученных угольных бассейнов и месторождений на территории Северной Азии.

Бассейны: I — Тунгусский; II — Кузнецкий; III — Минусинский; IV — Канско-Ачинский; V — Иркутский; VI — Улугхемский; VII — Западно-Сибирский; VIII — Южно-Якутский; IX — Нижнезейский; X — Бурейнский; XI — Среднеамурский; XII — Сахалинский; XIII — Раздольнинский; XIV — Бикино-Уссурийский; XV — Партизанский; XVI — Охотский; XVII — Аркагаалинский; XVIII — Яно-Омолойский; XIX — Ленский; XX — Таймырский; XXI — Горловский; XXII — Карагандинский; XXIII — Экибастузский; XXIV — Майкубенский.

Месторождения, углепроявления: 1 — Каякское; 2 — Кайерканское; 3 — Кокуйское; 4 — Гавриловское; 5 — Кодинское; 6 — Подкаменно-Тунгусское; 7 — Жеронское; 8 — Ай-Пимское; 9 — Арчинское; 10 — Верхнетарское; 11 — Верхнетромъеганское; 12 — Восточно-Пермяковская; 13 — Герасимовское; 14 — Григорьевское; 15 — Конитлорское; 16 — Лазаревское; 17 — Летняя; 18 — Ловинское; 19 — Лугинецкое; 20 — Малореченское; 21 — Мыльджинское; 22 — Нижнетабаганское; 23 — Новый Уренгой; 24 — Приграничное; 25 — СГ-7-397; 26 — Северо-Калиновое; 27 — Тальниковое; 28 — Трассовое; 29 — Умытгинское; 30 — Федоровское; 31 — Широтное; 32 — Южно-Табаганское; 33 — Яхлинское; 34 — Сыморьяхское; 35 — Эльгинское; 36 — Сергеевское; 37 — Ерквецкое; 38 — Райчихинское; 39 — Возновское; 40 — Жиганское; 41 — Шкотовское; 42 — Авангард; 43 — Липовецкое; 44 — Павловское; 45 — Ургальское; 46 — Бикинское; 47 — Ушумунское; 48 — Аркагаалинское; 49 — Каражыра; 50 — Курайское; 51 — Пыжинское; 52 — Талду-Дюргунское; 53 — Балхаш; 54 — Нурс-Хотгор; 55 — Хаар-Тарвагатай; 56 — Хундлун; 57 — Зээгт; 58 — Увур-Чулуут; 59 — Баянтэг; 60 — Таван-Толгой; 61 — Баганур; 62 — Тугрикнуурское; 63 — Алаг-Того; 64 — Адун-Чулун; 65 — Сайхан-Ово; 66 — Могойн-Гол; 67 — Шиве-Ово; 68 — Шарынгол; 69 — Маньт; 70 — Чандгантал; 71 — Хуренгол; 72 — Олонь-Шибирское; 73 — Татауровское; 74 — Тарбагатайское; 75 — Зашуланское; 76 — Харанорское; 77 — Загустайское; 78 — Бургуйское; 79 — Окино-Ключевское; 80 — Апсатское; 81 — Уртуйское; 82 — Кавринское; 83 — Туганское; 84 — Колпашевское; 85 — Лагерносадское; 86 — Таловское.

с интервалом отбора проб 0.5—10.0 см. Изменчивость содержания скандия по латерали оценивали на основании сети разрезов по пласту.

Определение содержания Sc в большинстве проб 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 производили в ядерно-геохимической лаборатории кафедры геоэкологии и геохимии Национального исследовательского Томского политехнического университета (ЯГЛ ТПУ) (аналитик А.Ф. Судыко). Предел обнаружения Sc в углях методом ИНАА — 0.02 г/т. Для контроля выполняли параллельные определения скандия в углях и золах углей, с соответствующими пересчетами

содержаний в золе на уголь и наоборот. Качество нейтронно-активационного анализа контролировалось по различным стандартам зола угля и горных пород (табл. 1).

Для части проб выполнено определение Sc в золе угля масс-спектрометрическим методом с индуктивно связанной плазмой в Институте проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН, г. Черноголовка (исполнитель В.К. Карандашев) и в центре коллективного пользования «Аналитический центр геохимии природных систем» Национального исследовательского Томского государственного университета (исполнитель Ю.В. Аношкина). Сходимость результатов различных методов анализа удовлетворительная (рис. 2).

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 месторождениях — как средневзвешенные по мощности пластов, а в бассейнах — как средневзвешенные по массе (ресурсам) угля в месторождениях [Арбузов, Ершов, 2007].

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

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Содержание скандия в угле. Среднее содержание скандия в изученных углях составляет 4.3 г/т при средней зольности 13.1 % (табл. 2). Среднее рассчитано как средневзвешенная величина на ресурсы угля. Модальная оценка среднего содержания скандия для 67 месторождений и бассейнов составляет 4.6 г/т, медиана — 4.2 г/т. Эти данные хорошо согласуются с оценкой среднего геометрического содержания скандия в углях Китая [Ren et al., 1999; Dai et al., 2012] и близки к данным по его среднему содержанию в углях США [Finkelman, 1993]. В то же время эти данные несколько выше, чем оценка среднего для углей мира (3.9 г/т), по [Ketris, Yudovich, 2009], что выдает обогащенность скандием углей изученного региона по сравнению со среднемировыми данными.

Среднее содержание скандия в углях отдельных месторождений в регионе изменяется от 0.85 г/т (Уртуйское месторождение в Забайкалье) до 16.0 г/т (Западно-Сибирский бассейн, угли мезозойского возраста). В отдельных пробах Переясловского месторождения Канско-Ачинского бассейна его концентрации достигают 230 г/т [Арбузов и др., 2008].

В золе угля среднее содержание скандия колеблется от 7.3 г/т (месторождение Адун-Чулун, Монголия) до 150 г/т (Западно-Сибирский бассейн, угли мезозойского возраста). В отдельных пробах зола угля Западно-Сибирского бассейна, его концентрации достигают 0.23 %.

Угли разного возраста даже в пределах одного региона отличаются по содержанию скандия. Угли девонского возраста характеризуются относительно выдержанным и повышенным по сравнению со среднемировыми данными его содержанием. В то же время специфические условия угленакопления в этот период обусловили повышенную зольность углей, в связи с чем концентрация металла в золе угля довольно низка (19.2 г/т).

Угли карбон-пермского возраста отличаются более значительными вариациями уровней накопления Sc. Для Сибири его содержание изменяется от 2.9 г/т в антрацитах Горловского бассейна до 8.2 г/т в каменных углях Минусинского бассейна. Повышено содержание Sc в углях Казахстана (Карагандинский бассейн и Экибастуз). Карбоновые угли Монголии в целом бедны

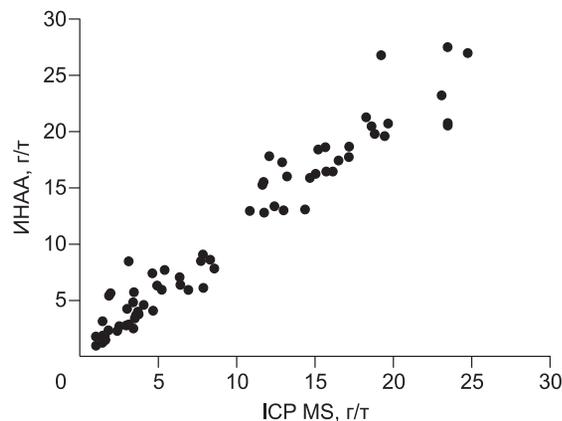


Рис. 2. Сходимость определения скандия методом инструментального нейтронно-активационного анализа (ИНАА) и масс-спектрометрическим методом с индуктивно связанной плазмой (ICP MS).

Таблица 2.

Содержание скандия в углях и золах углей

Угольный бассейн, месторождение	Число проб	A ^d , %	Содержание скандия, г/т	
			уголь	зола угля*
Сибирский регион				
<i>Угли девонского возраста</i>				
Барзасское	14	32.5	6.4 ± 0.7	19.7
Убруское	6	49.2	8.7 ± 1.3	17.7
Среднее	20	35.3	6.8 ± 0.8	19.2
<i>Угли карбон-пермского возраста</i>				
Горловский	24	7.0	2.9 ± 0.5	41.4
Кузнецкий	1394	13.5	3.9 ± 0.1	28.9
Минусинский	490	16.9	8.2 ± 0.6	48.5
Тунгусский	67	14.1	4.6 ± 1.4	32.6
Таймырский	51	24.4	7.4 ± 0.6	30.5
Курайское	12	25.2	6.9 ± 0.9	27.4
Среднее	2038	13.5	4.5 ± 0.8	33.2
<i>Угли мезозойского возраста</i>				
Пыжинское	6	6.5	2.9 ± 1.4	44.6
Канско-Ачинский	524	9.8	2.9 ± 0.5	29.6
Иркутский	129	14.3	6.7 ± 0.9	46.9
Улугхемский	45	9.3	2.3 ± 0.5	44.6
Западно-Сибирский	172	10.6	16.0 ± 2.1	150
Тунгусский	30	12.6	3.9 ± 0.6	23.8
Кузнецкий	3	17.3	6.4 ± 1.4	37.0
Олонь-Шибирское	40	15.3	4.6 ± 0.5	32.8
Татауровское	31	13.3	1.3 ± 0.4	9.8
Тарбагатайское	34	10.9	1.5 ± 0.5	13.8
Зашуланское	18	7.3	1.2 ± 0.4	16.4
Харанорское	41	10.0	1.2 ± 0.2	12.0
Загустайское	13	18.2	4.0 ± 1.1	22.0
Буртуйское	18	9.5	2.8 ± 0.4	29.5
Окино-Ключевское	8	19.2	4.7 ± 1.3	24.5
Ургуйское	8	7.9	0.85 ± 0.13	10.8
Апсатское	5	12.3	2.7 ± 0.3	22.0
Среднее	1125	12.0	3.9 ± 0.9	32.5
<i>Угли палеогенового возраста</i>				
Западно-Сибирский	73	30.7	13.3 ± 0.6	43.3
Талду-Дюргунское	29	19.8	9.1 ± 0.8	46.0
Среднее	102	30.7	13.3 ± 0.6	43.3
<i>Современный торф</i>				
Западно-Сибирский	1927	7.3	0.88 ± 0.17	12.2
Дальневосточный регион				
<i>Угли позднеюрско-нижнемелового возраста</i>				
Ерковецкое	23	14.2	2.0 ± 0.7	14.1
Райчихинское	19	13.6	3.5 ± 0.8	25.7
Эльгинское	47	16.1	2.1 ± 0.7	13.0
Ургальское	58	25.7	5.1 ± 0.3	19.8
Липовецкое	4	32.7	4.2 ± 0.5	12.8
Среднее	151	17.9	2.8 ± 0.6	15.4

Угольный бассейн, месторождение	Число проб	A^d , %	Содержание скандия, г/т	
			уголь	зола угля*
<i>Угли палеоген-неогенового возраста</i>				
Шкотовское	7	16.2	6.4 ± 1.3	39.5
Павловское	40	14.2	4.6 ± 0.6	32.4
Бикинское	16	17.4	10.5 ± 2.5	60.3
Ушумунское	9	10.1	2.9 ± 0.6	28.7
Яно-Омолойский	16	33.0	4.6 ± 1.0	13.9
Сахалинский	39	16.2	9.1 ± 0.7	56.2
Возновское	6	21.1	2.3 ± 0.8	10.9
Сергеевское	7	15.8	3.0 ± 0.4	19.0
Среднее	140	23.5	6.8 ± 0.9	28.9
Казахстан				
<i>Угли карбонового возраста</i>				
Карагандинский	3	9.8	6.0 ± 1.7	61.2
Экибастузский	41	36.1	8.3 ± 0.4	23.0
Среднее	44	23.0	7.2 ± 0.5	31.3
<i>Угли юрского возраста</i>				
Каражыра	7	11.2	8.9 ± 0.9	79.7
Майкубенский	10	25.5	8.1 ± 1.6	31.8
Среднее	17	18.4	8.5 ± 1.3	46.3
Монголия				
<i>Угли карбонового возраста</i>				
Нурс-Хотгор	122	18.2	3.4 ± 0.3	18.7
Хаар-Тарвагагай	10	18.7	2.7 ± 0.2	14.4
Хундлун	8	9.4	1.8 ± 0.3	19.1
Зээгт	10	12.5	1.2 ± 0.2	9.6
Среднее	150	14.7	2.3 ± 0.5	15.6
<i>Угли пермского возраста</i>				
Таван-Толгой	10	9.8	1.8 ± 0.2	18.4
Маньт	16	20.2	4.9 ± 0.5	24.3
Увур-Чулуут	5	17.2	7.9 ± 2.5	45.9
Хуренгол	28	38.9	4.8 ± 0.3	12.3
Среднее	49	21.2	4.9 ± 1.2	22.5
<i>Угли юрского возраста</i>				
Сайхан-Ово	6	9.7	3.9 ± 0.9	40.2
Могойн-Гол	15	14.8	4.2 ± 1.5	28.4
Баянтэг	8	14.8	11.6 ± 1.8	78.4
Шарынгол	29	12.2	6.0 ± 0.5	52.7
Среднее	58	12.9	6.4 ± 2.5	49.9
<i>Угли мелового возраста</i>				
Алаг-Того	10	28.6	3.0 ± 0.8	10.5
Адун-Чулун	10	12.5	0.9 ± 0.1	7.3
Баганур	2	8.1	1.1 ± 0.1	13.6
Тугрикнуурское	7	13.3	2.3 ± 0.3	17.3
Шиве-Ово	28	Н.о.	1.3 ± 0.4	Н.о.
Чандгантал	13	21.3	11.2 ± 3.5	52.6
Среднее	70	16.8	3.3 ± 1.6	19.7
Среднее для Северной Азии	5891	13.1 ± 1.1	4.3 ± 0.4	32.8
Среднее для углей мира**	8400	—	3.9	23.0

Примечание. Н.о. — не определено; A^d — зольность. Анализы выполнены методом ИНАА в ЯГЛ ТПУ, аналитик А.Ф. Судько.

* Пересчитано на золу.

** По [Ketris, Yudovich, 2009].

скандием. Однако среди месторождений пермского возраста встречаются угли с повышенными его концентрациями (см. табл. 2).

Угли мезозойского возраста встречаются на всей исследованной территории. Они отличаются наиболее значительными вариациями содержания Sc. Здесь выявлены аномально скандиеносные угли Западно-Сибирского и Иркутского бассейнов в Сибири, месторождений Баянтэг, Шарынгол и Чандгантал в Монголии. Юрские угли Казахстана также отличаются повышенными уровнями накопления Sc. Для мезозойских углей характерны не только аномально высокие, но и аномально низкие его содержания на уровне 1—2 г/т (месторождения Уртуйское, Зашуланское, Харанорское, Татауровское в Забайкалье).

Угли палеоген-неогенового возраста распространены на Дальнем Востоке и в Сибири. Для них характерны в целом повышенные уровни накопления Sc, однако из-за высокой зольности содержание Sc в золе часто ниже средней величины для изученного региона. В составе молодых углей выделяются Западно-Сибирский и Сахалинский бассейны, а также Талду-Дюргунское месторождение в Горном Алтае и Бикинское в Приморье с высоким содержанием Sc. В углях Сахалинского бассейна содержится 9.1 г/т Sc, в золе угля — 56.2 г/т.

Закономерности распределения скандия. Значительные вариации содержания скандия в среднем по месторождениям и бассейнам указывает на неравномерный характер его распределения в пространстве и времени. На значительную латеральную изменчивость содержания Sc в пределах региона указывает также и неоднородность его содержания в углях одного возрастного диапазона. Так, в углях карбон-пермского возраста в Сибири среднее его содержание изменяется от 2.9 г/т в Горловском бассейне до 8.2 г/т в Минусинском бассейне. В палеоген-неогеновых углях Дальнего Востока России среднее содержание скандия варьирует от 2.3 г/т (Возновское месторождение) до 10.5 г/т (Бикинское месторождение). Во всех случаях высокие концентрации скандия в углях приурочены к районам со значительным распространением в составе области питания угленосного бассейна пород базитового ряда (базальтоиды, габброиды, амфиболиты), характеризующихся повышенным содержанием Sc.

В пределах угольных месторождений и бассейнов его содержание и распределение также зависят от наличия в области питания бассейна обогащенных скандием пород. Кроме того, отчетливо проявлена зональность, выраженная в снижении содержания скандия в направлении от области сноса к центру бассейна.

Вертикальное распределение скандия так же неоднородно, как и латеральное. При этом в разрезе угленосной толщи в пределах стратиграфических подразделений его содержание закономерно изменяется снизу вверх. Возможны различные варианты, обусловленные особенностями геологического развития территории, но в целом в границах стратиграфических подразделений преобладает обогащение нижних и верхних частей разреза на фоне центральной части [Арбузов, Ершов, 2007].

Еще более дифференцировано распределение Sc в вертикальном разрезе отдельного угольного пласта. Подобно другим углефильным элементам (элементам, обогащающим золу угля по сравнению с углевмещающими породами [Юдович, Кетрис, 2002]), скандий отчетливо обогащает приконтактные зоны угольных пластов: участки вблизи кровли и подошвы пласта (рис. 3). Содержание скандия на этих участках пласта может отличаться от внутренних зон более чем на порядок. Мощность зон повышенных концентраций металла не зависит от мощности угольного пласта. Это обстоятельство обуславливает известную закономерность, установленную для германия, — более высокое содержание Sc в маломощных пластах по сравнению с более мощными [Ломашов, Лосев, 1962; Yudovich, 2003]. Объясняется это большей долей обогащенных приконтактных интервалов в разрезе маломощных пластов по сравнению с более мощными пластами. Установлена значимая отрицательная корреляционная связь между мощностью пласта и содержанием Sc в угле и золе угля. В частности, для аномально скандиеносных углей Западно-Сибирского бассейна коэффициент корреляции между содержанием скандия и мощностью пласта для 49 пластопересечений составляет -0.31 . Изучение современных торфяников показывает, что формирование приконтактных зон обогащения начинается еще на стадии торфонакопления. Отсутствие прямой связи с зольностью угля указывает на гидрогенную природу этих приконтактных аномалий. Необходимо отметить, что приконтактные зоны накопления Sc установлены не во всех исследованных угольных разрезах, но угольные пласты с такими зонами, обогащенными скандием, безусловно, преобладают. Как показал анализ более сотни вертикальных разрезов угольных пластов, на наличие или отсутствие этих зон не влияет состав перекрывающих и подстилающих отложений. Они одинаково хорошо проявлены при песчаном, алевролитовом и аргиллитовом составе углевмещающих пород. В изученных современных торфяниках Западной Сибири приконтактные зоны обогащения проявлены реже и часто менее контрастно. Но и здесь в основании торфяной залежи содержание скандия в золе торфа иногда превышает 100 г/т при фоновых значениях в целом для разреза 5—10 г/т. Такие зоны обогащения установлены как в низинных, так и в верховых торфяниках.

Факторы, контролирующие накопление скандия в углях. Среди множества факторов, определяющих уровни накопления и закономерности распределения скандия в угольных пластах, ведущее зна-

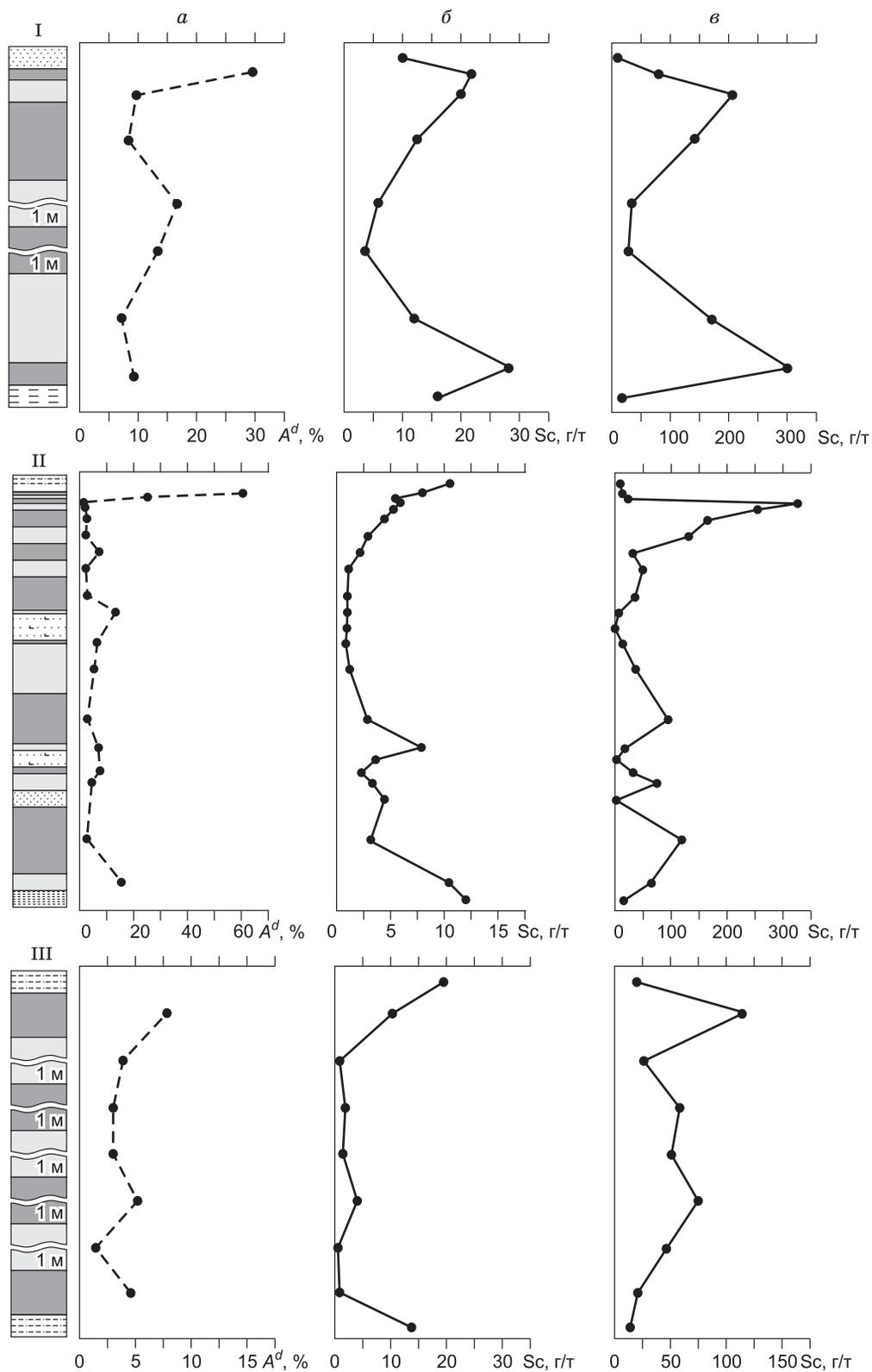


Рис. 3. Распределение зольности (а) и скандия в угле (б) и в золе угля (в) в вертикальном профиле угольного пласта.

I — бурый уголь. Пласт Рыбинский II, Бородинское месторождение, Канско-Ачинский бассейн; II — каменный уголь. Пласт Двухаршинный, Минусинский бассейн; III — антрацит. Пласт Главный II, Месторождение Ургунское, Горловский бассейн.

1 — уголь, 2 — аргиллит, 3 — алевролит, 4 — песчаник, 5 — тонштейн, 6 — алевропесчаник. A^d — зольность.

чение имеет состав области питания бассейна угленакопления (фактор петрофонда, по Я.Э. Юдовичу [Юдович, Кетрис, 2002]), фациальный фактор, гидрогеохимический фактор и фактор угольного метаморфизма.

Фактор петрофонда. Анализ геологического положения скандиеносных углей указывает на их связь с районами, содержащими обогащенные скандием породы (геохимически специализированные комплексы), главным образом базитового ряда. Это в первую очередь Западно-Сибирский бассейн, особенно его зауральская часть со средним содержанием скандия 16 г/т в угле и 150 г/т в золе. К таким бассейнам относятся Сахалинский, Минусинский и Иркутский бассейны и ряд месторождений Монголии (Баянтэг, Шарыngoл и Чандгантал). Для всех этих месторождений характерно наличие в области питания бассейна угленакопления геохимически специализированных комплексов базитового ряда. Для аномально обогащенных скандием углей Шаимского района Западно-Сибирского бассейна такой областью сноса является Урал. Исследованиями ряда специалистов [Федоров и др., 2009; Фролова и др., 2011] показано, что в формировании терригенных отложений угленосной тюменской свиты Шаимского района ведущую роль играли породы основного состава. Для Иркутского бассейна такой областью сноса являются скандиеносные траппы Сибирской платформы. Высокие содержания скандия в углях Азейского месторождения пространственно тяготеют к северному обрамлению бассейна, сложенному терригенно-карбонатными отложениями ордовикского возраста с мощными покровами и силлами траппов триасового возраста с развитыми по ним корами выветривания [Арбузов и др., 2012]. Скандиеносные угли Минусинского бассейна также отчетливо приурочены к блокам структур обрамления с широким развитием в них фемических структурно-формационных комплексов [Арбузов, Ершов, 2007].

Таким образом, во всех случаях аномального или просто повышенного содержания Sc в углях и золах углей прослеживается их связь с базитовыми комплексами в обрамлении угольных месторождений и бассейнов.

Фациальный фактор. Фациальный фактор также играет важную роль в формировании геохимического фона угольных пластов. Более высокие исходные содержания Sc, так же как и повышенная зольность, характерны для углей, сформировавшихся из низинных торфяников. Низинный торф обогащен скандием по сравнению с верховым [Арбузов и др., 2009]. При этом зола верхового торфа обогащена скандием относительно низинного торфа так же, как и зола малозольных углей по отношению к углям с повышенной зольностью. Это позволяет утверждать, что значительная часть Sc накапливается в углях еще на торфяной стадии. Из этих данных также следует, что при близкой зольности торфа содержания Sc в залежи могут различаться весьма существенно, что указывает на важную роль фактора петрофонда и, возможно, гидрогеохимического фактора в накоплении металла в торфе и в образовании из него угля.

Гидрогеохимический фактор. Гидрогеохимический фактор является определяющим для накопления Sc в углях наряду с фактором петрофонда. Скандий плохо растворяется в воде в условиях зоны гипергенеза и слабо переносится в поверхностных водах. Среднее содержание Sc в поверхностных пресных водах составляет лишь 0.004 мг/л [Шварцев, 1998]. При этом в разных условиях и районах его концентрации могут значительно варьировать. По тем же данным, в поверхностных водах Швеции его содержание достигает 0.045 мг/л. В болотных водах содержание Sc часто значительно выше. Так, воды из канала осушительной системы Васюганского болота в Западной Сибири содержат 0.18 мг/л Sc [Савичев, 2003]. В подземных и грунтовых водах содержание скандия выше, чем в поверхностных. Наиболее высоко оно в водах горно-таежных областей и составляет в среднем 0.08 мг/л [Шварцев, 1998]. В современных кислых шахтных водах Кизеловского бассейна (pH = 2—4) его концентрация достигает 45 мг/л [Торикова и др., 1996], почти в 10 000 раз превышая его содержание в поверхностных пресных водах. Высокие концентрации скандия в подземных водах зоны гипергенеза по сравнению с поверхностными объясняются наличием в их составе восстановителей и органического вещества [Шварцев, 1998]. Это согласуется с данными о высоком содержании скандия в болотных водах. Предполагается, что Sc мигрирует в этих условиях в форме растворимых органических комплексов.

Характер распределения Sc в угольном пласте указывает на накопление его из водных растворов на границе угольного пласта (торфяной залежи). Низкая миграционная способность Sc в водах зоны гипергенеза позволяет отказаться от модели дальнего переноса его из коры выветривания в растворенном виде и предположить вынос и перераспределение его непосредственно в пределах угленосной толщи. Накопление скандия в угле обусловлено формированием терригенной толщи в бассейне седиментации со значительной ролью в ее составе пород основного состава, дальнейшим его извлечением в водный раствор с участием органических кислот, транспортировку внутри толщи, миграцию в торфяную залежь и в угольный пласт и отложение. Такая модель накопления скандия в углях подтверждается характером его распределения в угольном пласте, установленными фактами высокого его содержания в кислых подземных и грунтовых водах и способностью давать устойчивые комплексы с гуминовыми и фульвокислотами [Комиссарова, 2006].

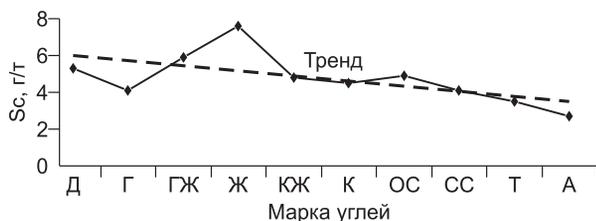


Рис. 4. График и тренд изменения содержания скандия в углях при изменении степени метаморфизма (Кузбасс, Россия).

Марки углей: Д — длинноплазменный, Г — газовый, ГЖ — газовый-жирный, Ж — жирный, КЖ — коксующийся жирный, К — коксующийся, ОС — отощенный спекающийся, Т — тощий, А — антрацит.

Содержание скандия в углевмещающих толщах и особенности гидрогеохимии бассейна определяют возможность надфонового его накопления в углях. Аномальные по содержанию скандия угольные месторождения и бассейны отличаются повышенными в 1.5—3.0 раза по сравнению с кларком содержаниями скандия в углевмещающих породах [Ескенази, 1996; Арбузов и др., 2003; Арбузов, Ершов, 2007].

Фактор метаморфизма. Роль этого фактора заключается в том, что в процессе угольного метаморфизма изменяется содержание Sc в углях в результате его перераспределения и выноса. На вынос Sc при метаморфизме указывают результаты сопоставления его содержания в углях разных марок. Доказательства факта выноса не всегда достаточно убедительны, так как содержание металла в углях зависит от многих причин, а для оценки значимости этого фактора необходимо сравнение углей разной степени угольного метаморфизма, но образовавшихся при прочих равных условиях. Показательно сопоставление углей разной степени углефикации (угли разных марок) в пределах одного месторождения или бассейна с единой областью питания бассейна торфо(угле)накопления. Примером могут служить угли Кузбасса [Арбузов и др., 2000]. Здесь отчетливо видно уменьшение содержания скандия от углей марки Д к антрацитам (рис. 4). Подобные результаты получены при изучении канадских углей мелового возраста разной степени метаморфизма (Альберта, Канада) [Goodarzi, Cameron, 1987]. Таким образом, региональный метаморфизм углей приводит к потере скандия.

Еще более контрастны результаты выноса скандия при контактовом метаморфизме. Однако в отличие от регионального метаморфизма, обуславливающего массовый вынос металла, здесь установлены сравнительно маломощные зоны его выноса и переотложения непосредственно у контакта с интрузией. На небольшом удалении имеет место обогащение угля скандием одновременно с ростом зольности [Арбузов, Ершов, 2007].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Угли азиатской части России, Монголии и Казахстана в целом обогащены скандием по сравнению со средними оценками для углей мира. При этом в различных районах изученного обширного региона установлен ряд угольных месторождений, аномально обогащенных скандием вплоть до промышленно значимых концентраций. Эти месторождения приурочены к блокам горных пород с повышенным содержанием скандия. Состав пород обрамления, фациальная обстановка древнего торфонакопления и гидрогеохимические условия бассейнов и месторождений определяют уровни накопления Sc в углях. В процессе угольного метаморфизма установлено перераспределение и частичный вынос скандия из угольного пласта. Особенности распределения скандия в месторождениях и угольных пластах указывают на преимущественно гидрогенный механизм накопления аномальных его концентраций в углях и торфах. Предполагается, что накопление скандия в углях и торфах обусловлено его выщелачиванием из углевмещающих пород и переотложением в угольный (торфяной) пласт с участием грунтовых и подземных вод, обогащенных органическими кислотами. Для накопления в углях высоких концентраций скандия необходимы условия для формирования углевмещающих пород, обогащенных скандием, и условия для его выщелачивания и транспортировки в угольный пласт (торфяную залежь). Такие условия реализуются в современных болотных системах Западной Сибири и могли реализоваться в древних бассейнах торфо(угле)накопления.

Авторы выражают признательность доктору геолого-минералогических наук, главному научному сотруднику Института геологии Коми НЦ УрО РАН Я.Э. Юдовичу за конструктивную критику и рекомендации по улучшению работы.

ЛИТЕРАТУРА

- Арбузов С.И., Ершов В.В. Геохимия редких элементов в углях Сибири. Томск, Изд. дом «Д-Принт», 2007, 468 с.
- Арбузов С.И., Поцелуев А.А., Рихванов Л.П. Редкоземельные элементы и скандий в углях Араличевского района Кузбасса // Геология и геофизика, 1996, т. 37, (3), с. 68—73.

- Арбузов С.И., Ершов В.В., Поцелуев А.А., Рихванов Л.П., Советов В.М.** Редкоземельные элементы и скандий в углях Кузбасса // Литология и полезные ископаемые, 1997, № 3, с. 315—326
- Арбузов С.И., Ершов В.В., Поцелуев А.А., Рихванов Л.П.** Редкие элементы в углях Кузнецкого бассейна. Кемерово, Изд-во КПК, 2000, 246 с.
- 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, Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2003, 347 с.
- 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.
- Арбузов С.И., Архипов В.С., Бернатонис В.К., Бобров В.А., Маслов С.Г., Межибор А.М., Прейс Ю.И., Рихванов Л.П., Судыко А.Ф., Сысо А.И.** Среднее содержание некоторых элементов-примесей в торфах юго-восточной части Западно-Сибирской плиты // Изв. Томского политех. ун-та. Науки о Земле, 2009, т. 315, № 1, с. 44—48.
- Арбузов С.И., Волостнов А.В., Ильенок С.С., Рыбалко В.И.** Природа тонштейнов Азейского месторождений Иркутского угольного бассейна // Изв. Томского политех. ун-та. Науки о Земле, 2012, т. 321, № 1, с. 89—97.
- Борисова Т.Ф., Гурен Г.Ф., Комиссарова Л.Н., Шацкий В.М.** Распределение скандия в угольном веществе // Химия твердого топлива, 1974, № 5, с. 10—13.
- Валиев Ю.Я., Гофен Г.И., Пачаджанов Д.Н.** Элементы-примеси в юрских антрацитах Назар-Ай-локского месторождения (Центральный Таджикистан) // Геохимия, 1993, № 2, с. 243—251.
- Гордон С.А., Гурен Г.Ф., Комиссарова Л.Н., Шацкий В.М.** О характере распределения скандия в угле // Исследования по химии горных пород (Тр. МГИ). М., Недра, 1968, с. 32—37.
- Гурен Г.Ф., Комиссарова Л.Н., Менковский М.А., Шацкий В.М.** О характере распределения скандия и фосфора в угле // Химия твердого топлива, 1968, № 6, с. 148—151.
- Ескенази Г.** Скандий в болгарских углях // Ежегодник Софийского ун-та. Геол.-геогр. факультет. Кн. 1 Геология, 1996, т. 89, с. 205—217.
- Каширцев В.А., Зуева И.Н., Сукнев В.С., Митронов Д.В., Сяндюков 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.
- Комиссарова Л.Н.** Неорганическая и аналитическая химия скандия. М., Эдиториал УРСС, 2006, 512 с.
- Крюкова В.Н., Вязова Н.Г., Латышев В.П.** Распределение скандия в веществе углей Восточной Сибири // Химия твердого топлива, 2001, № 3, с. 73—76.
- Ломашов И.П., Лосев Б.И.** Германий в ископаемых углях. М., Изд-во АН СССР, 1962, 258 с.
- Менковский М.А., Комиссарова Л.Н., Гурен Г.Ф., Шацкий В.М.** Распределение скандия в продуктах кислотной деминерализации каменного угля // Исследования по химии горных пород (Тр. МГИ, № 38). М., Недра, 1968, с. 38—42.
- Савичев О.Г.** Реки Томской области: состояние, использование и охрана. Томск, Изд-во ТПУ, 2003, 202 с.
- Середин В.В., Арбузов С.И., Алексеев В.П.** Скандиеносные угли Яхлинского месторождения, Западная Сибирь // ДАН, 2006, т. 409, № 5, с. 677—682.
- Торикова М.В., Кудинов Ю.А., Тимофеев П.В.** Редкие металлы в нефтях, ископаемых углях, продуктах их переработки и минерализованных водах // Разведка и охрана недр, 1996, № 8, с. 21—23.
- Федоров Ю.Н., Маслов А.В., Ронкин Ю.Л.** Систематика редкоземельных элементов в юрских песчаниках Шаимского нефтегазоносного района (Западная Сибирь) // Литология и геология горючих ископаемых. Екатеринбург, Изд-во Уральского гос. горного ун-та, 2009, вып. III (19), с. 45—56.
- Фролова Е.В., Хасанова К.А., Алексеев В.П.** Верификация палеогеографических реконструкций посредством анализа геохимических данных отложений тюменской свиты Шаимского нефтегазоносного района Ямбургского месторождения (Западная Сибирь) // Литология и геология горючих ископаемых. Екатеринбург, Изд-во Уральского гос. горного ун-та, 2011, вып. V (21), с. 84—89.
- Шварцев С.Л.** Гидрогеохимия зоны гипергенеза. М., Недра, 1998, 366 с.
- Юдович Я.Э., Кетрис М.П.** Неорганическое вещество углей. Екатеринбург, УрО РАН, 2002, 422 с.
- Юдович Я.Э., Кетрис М.П.** Ценные элементы-примеси в углях. Екатеринбург, УрО РАН, 2006, 538 с.
- Юровский А.З.** Минеральные компоненты твердых горючих ископаемых. М., Недра, 1968, 214 с.

Dai S., Ren D., Chou C.-L., Finkelman R.B., Seredin V.V., Zhou Y. Geochemistry of trace elements in Chinese coals: a review of abundances, genetic types, impacts on human health, and industrial utilization // *Int. J. Coal Geol.*, 2012, v. 94, № 1, p. 3—21.

Finkelman R.B. Trace and minor elements in coal // *Organic geochemistry* / Eds. M.N. Engel, S.A. Macko. New York, Plenum Press, 1993, p. 593—607.

Goodarzi F., Cameron A.R. Distribution of major, minor and trace elements in coals of the Kootenay Group, Mount Allan, Alberta // *Canad. Miner.*, 1987, v. 25, p. 555—565.

Ketris M.P., Yudovich Ya.E. Estimations of clarkes for carbonaceous bioliths: world averages for trace element contents in black shales and coals // *Int. J. Coal. Geol.*, 2009, v. 78, № 2, p. 135—148.

Ren D., Zhao F., Wang Y., Yang S. Distribution of minor and trace elements in Chinese coals // *Int. J. Coal. Geol.*, 1999, v. 40, № 2—3, p. 135—148.

Seredin V.V., Finkelman R.B. Metalliferous coals: a review of the main genetic and geochemical types // *Int. J. Coal Geol.*, 2008, v. 70, p. 253—289.

Swaine D.J. Scandium in Australian coals and related materials // *Amer. Chem. Soc. Preprints, Division of Fuel Chemistry*, 1964, v. 8, № 3, p. 172—177.

Yudovich Ya.E. Notes on the marginal enrichment of germanium in coal beds // *Int. J. Coal. Geol.*, 2003, v. 56, № 3—4, p. 223—232.

*Рекомендована к печати 26 ноября 2013 г.
В.А. Каширцевым*

*Поступила в редакцию
4 июля 2013 г.*