

нитах переменного состава с признаками гидротермальной проработки.

4. Зона нефтепроявления — залежи нефти в триасовых породах коры выветривания — сформирована в результате притока углеводородов из низов тюменской свиты.

Полученные содержание и молекулярно-массовое распределение насыщенных углеводородов рассматриваются как экспериментальное

свидетельство межпластовых перемещений юрских нефтей, приводящих к образованию залежей в коллекторах коры выветривания и фундамента.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы» «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007–2013 годы».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брехунцов А.В., Монастырев Б.В., Нестеров И.И. (мл.) Закономерности размещения залежей нефти и газа Западной Сибири // Геология и геофизика. — 2011. — Т. 52. — № 8. — С. 1001–1012.
2. Исаев Г.Д., Аухатов Я.Г. Прогноз нефтегазоносности палеозоя с новых концептуальных позиций // Пути реализации нефтегазового потенциала Ханты-Мансийского автономного округа—Югры: Т. 1. — Ханты-Мансийск: ИздатНаукаСервис, 2006. — С. 113–121.
3. Коровина Т.А., Кропотова Е.П., Минченков Н.Н., Батурин А.Ю., Николаева Е.В. Доюрское основание (ПСЭ) в Западной Сибири — объект новых представлений на природу нефтегазоносности (из опыта исследований и практического освоения Рогожниковского ЛУ) // Пути реализации нефтегазового и рудного потенциала Ханты-Мансийского автономного округа—Югры: Т. 1. — Ханты-Мансийск: ИздатНаукаСервис, 2009. — С. 214–218.
4. Медведев Н.Я., Кос И.М., Ларичев А.И., Смирнов Л.В., Бостриков О.И., Фомичев А.С. Прогноз нефтегазоносности в зонах дезинтеграции доюрского фундамента на Сургутском своде и прилегающих территориях // Пути реализации нефтегазо-

вого и рудного потенциала Ханты-Мансийского автономного округа—Югры: Т. 1. — Ханты-Мансийск: ИздатНаукаСервис, 2007. — С. 189–196.

5. Пуанова С.А., Шустер В.Л. Геолого-геохимические предпосылки нефтегазоносности доюрских отложений Западно-Сибирской платформы // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. — 2012. — № 6. — С. 20–26.
6. Жильцова А.А., Исаев В.И., Коржов Ю.В. Вертикальная геохимическая зональность нефтегазоносных комплексов (на примере Рогожниковского и Северо-Рогожниковского месторождений) // Известия Томского политехнического университета. — 2013. — Т. 322. — № 1. — С. 69–82.
7. Атлас «Геология и нефтегазоносность Ханты-Мансийского автономного округа» / под ред. Э.А. Ахпателова, В.А. Волкова, В.Н. Гончаровой, В.Г. Елисеева, В.И. Карасева, А.Г. Мухер, Г.П. Мясниковой, Е.А. Теплякова, Ф.З. Хафизова, А.В. Шпильман, В.М. Южаковой. — Екатеринбург: ИздатНаукаСервис, 2004. — 148 с.
8. Гончаров И.В. Геохимия нефтей Западной Сибири. — М.: Недра, 1987. — 179 с.

Поступила 29.03.2013 г.

УДК 550.42:552.57

ПРИРОДА АНОМАЛЬНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ СКАНДИЯ В УГЛЯХ

С.И. Арбузов

Томский политехнический университет
E-mail: siarbuзов@mail.ru

Рассмотрена природа накопления аномально высоких содержаний скандия в углях на основе анализа особенностей их распределения в углях и торфах Сибири, российского Дальнего Востока, Монголии, Казахстана и Ирана. Установлена связь содержания скандия в углях с составом пород обрамления бассейнов угленакопления. Предложена модель накопления аномальных концентраций скандия в углях. Приведены доказательства гидрогенного его концентрирования в угольных пластах.

Ключевые слова:

Уголь, геохимия, скандий, факторы накопления.

Key words:

Coal, geochemistry, scandium, factors of accumulation.

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. Особый интерес среди них представляет скандий, как эле-

мент 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. Зола таких углей вполне могли бы составить конкуренцию традиционным источникам скандия.

Несмотря на довольно большой объем информации о содержании скандия в углях, геохимия его изучена недостаточно. В настоящее время нет отчетливого представления о причинах и условиях накопления высоких концентраций скандия в углях. Не выяснена взаимосвязь уровней накопления скандия с фациальными условиями угленакопления и с петрографическим составом углей, недостаточно оценена роль области питания бассейнов угленакопления в формировании скандиеносных углей, не оценено влияние процессов метаморфизма на его перераспределение в угольном пласте, не оценена роль эпигенетических процессов. Не разработаны модели аномального накопления скандия в углях, и, как следствие, отсутствуют критерии поисков скандиеносных углей. Решение этих сложных вопросов возможно только на основе детальных геохимических исследований. В данной работе рассмотрена природа повышенного содержания скандия в углях, в том числе выполнен геохимический анализ условий формирования аномально скандиеносных углей.

Характеристика объектов исследования

Исследование природы накопления скандия в углях выполнено на основе многочисленных данных, полученных авторами при изучении угольных месторождений на территории азиатской части Российской Федерации, Монголии, Казахстана и Ирана (рисунок). Выбор объектов изучения определялся задачами исследований, включающими оценку содержания скандия в углях, 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.

Изучены угольные месторождения Сибири, представленные 9 угольными бассейнами и 14 самостоятельными месторождениями. Сибирский регион представлен углями всех марок, от лигнитов до антрацитов, широкого возрастного диапазона, от девона до палеогена. Здесь также установлены развитые по углям контактово-метаморфические графитовые породы.

Дальний Восток России исследован менее детально. Здесь преобладают угли более молодого возраста, чем в Сибирском регионе: позднеюрские, меловые, палеогеновые и неогеновые. Для него характерны менее зрелые угли, чем для Сибири, и существенная роль вулканизма в формировании угленосных отложений.

Впервые представительные геохимические исследования выполнены на территории Монголии. Особенность угольных месторождений Монголии — большой возрастной диапазон углеобразования и ярко выраженная возрастная зональность в направлении с востока на запад. Своеобразная минерализация и геохимия региона, активная магматическая и вулканическая деятельность, широкое

распространение гранитоидных формаций и современный аридный и семиаридный климат сказались и на геохимических особенностях угольных месторождений Монголии.

Небольшой массив данных получен по угленосным отложениям Казахстана. Они представлены углями Экибастуза и Карагандинского бассейна карбонового возраста, Майкубенского бассейна и месторождения Каражыра юрского возраста.

Впервые массово опробованы и детально изучены угли Ирана. Их особенность — преимущественное распространение углей высоких стадий метаморфизма. Угли Ирана сформировались в основном в триас-юрское время. Отличительная особенность углеобразовательных процессов в Иране — преимущественно нестабильная тектоническая обстановка, обусловившая формирование многочисленных маломощных угольных пластов повышенной зольности.

В исследуемой коллекции проб по территории Сибири, Российского Дальнего Востока, Казахстана, Монголии и Ирана 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 анализа природы накопления скандия в углях являются результаты количественного анализа Sc в 6114 пробах угля и торфа (таблица) и более чем 2000 пробах углевмещающих пород различных месторождений.

Опробование угольных пластов выполнялось бороздовым 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 с интервалом отбора проб 0,5...10 см. Изменчивость содержания скандия по латерали оценивалась на основании сети разрезов по пласту.

Определение содержания Sc в большинстве проб выполнено инструментальным нейтронно-активационным анализом (ИНАА) непосредственно в угле без предварительного концентрирования. Лабораторное определение Sc в углях, золах углей и породах производилось в Ядерно-геохимической лаборатории кафедры геоэкологии и геохимии Томского политехнического университета (исполнитель 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 содержания в золе на уголь и наоборот. Во всех случаях схо-

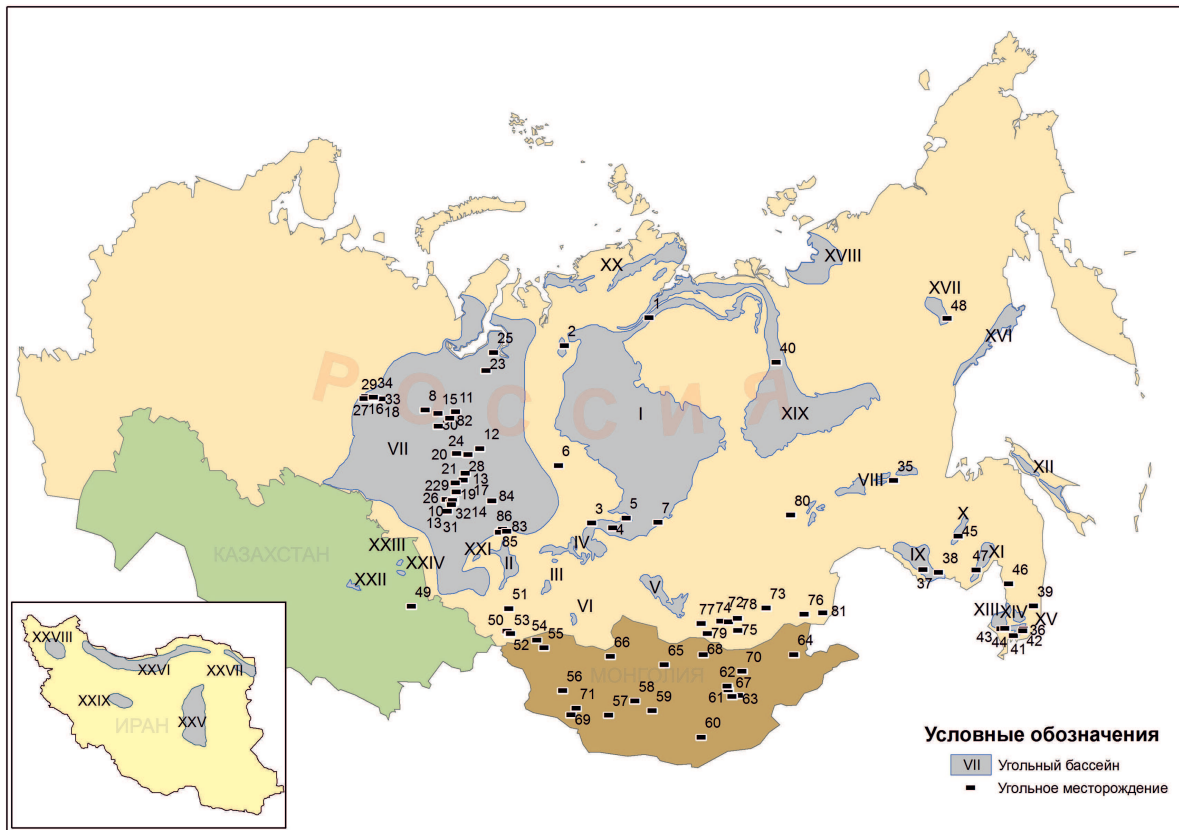


Рисунок. Размещение изученных угольных бассейнов и месторождений на территории Азии

Бассейны: I – Тунгусский; II – Кузнецкий; III – Минусинский; IV – Канско-Ачинский; V – Иркутский; VI – Улугхемский; VII – Западно-Сибирский; VIII – Южно-Якутский; IX – Нижнезейский; X – Буреинский; XI – Средне-Амурский; XII – Сахалинский; XIII – Раздольненский; XIV – Бикино-Усурийский; XV – Партизанский; XVI – Охотский; XVII – Аркагалинский; XVIII – Яно-Омолыйский; XIX – Ленский; XX – Таймырский; XXI – Горловский; XXII – Карагандинский; XXIII – Экибастузский; XXIV – Майкубенский; XXV – Табасский; XXVI – Эльбурсский;

Угленосные районы: XXVII – Северо-Хорасанский; XXVIII – Мерагинский; XXIX – Кашан-Эсфahanский

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 – В-Тромъеганское; 12 – Восточно-Пермяковская; 13 – Герасимовское; 14 – Григорьевское; 15 – Конитлорское; 16 – Лазаревское; 17 – Летнее; 18 – Ловинское; 19 – Лугинецкое; 20 – Малореченское; 21 – Мильджинское; 22 – Н.Табаганское; 23 – Новый Уренгой; 24 – Приграничное; 25 – СГ-7-397; 26 – С.Калиновое; 27 – Тальниковое; 28 – Трассовое; 29 – Умытйинское; 30 – Федоровское; 31 – Широное; 32 – Ю.Табаганское; 33 – Яхлинское; 34 – Сыморьяхское; 35 – Эльгинское; 36 – Сергеевское; 37 – Ерковецкое; 38 – Райчихинское; 39 – Возновское; 40 – Жиганское; 41 – Шкотовское; 42 – Авангард; 43 – Липовецкое; 44 – Павловское; 45 – Ургальское; 46 – Бикинское; 47 – Ушумунское; 48 – Аркагалинское; 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 – Тарвагатайское; 75 – Зашуланское; 76 – Харанорское; 77 – Загустайское; 78 – Буртуйское; 79 – Окино-Ключевское; 80 – Апсатское; 81 – Уртуйское; 82 – Кавринское; 83 – Туганское; 84 – Колпашевское; 85 – Лагерносадское; 86 – Таловское

димность результатов удовлетворительная. Более детально вопросы методики опробования и аналитических исследований изложены в работе [1].

Результаты исследований и их обсуждение

Содержание и закономерности распределения скандия в углях

Среднее содержание скандия в изученных углях Сибири, российского Дальнего Востока, Монголии, Казахстана и Ирана составляет 4,3 г/т при средней зольности 13,1 % (таблица). Эти данные хорошо согласуются с оценкой среднего геометрического содержания скандия в углях Китая [2] и

близки к данным по его среднему содержанию в углях США [3]. В то же время эти данные несколько выше, чем оценка среднего для углей мира (3,9 г/т) по [4].

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).

Аномально высокие концентрации скандия установлены в углях разного возраста, но наиболее часто встречаются в угольных месторождениях юрского возраста. Максимальные содержания, дости-

Таблица. Содержание скандия в углях и золах углей

Угольный бассейн, месторождение	Число проб	A ^d , %	Содержание скандия, г/т	
			уголь	зола угля*
Сибирский регион				
Угли девонского возраста				
Барзасское	14	32,5	6,4±0,7	19,7
Убрусское	6	49,2	8,7±1,3	17,7
Среднее	20	35,3	6,8±0,8	19,2
Угли карбон-пермского возраста				
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	10	8,6	4,6±1,4	53,5
Курайское	12	25,2	6,9±0,9	27,4
Среднее	1997	13,5	4,5±0,8	33,2
Угли мезозойского возраста				
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
Олень-Шибирское	40	15,3	4,6±0,5	32,8
Татауровское	31	13,3	1,3±0,4	9,8
Тарбагатaysкое	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
Уртуйское	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
Угли палеогенового возраста				
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
Современный торф				
Западно-Сибирский	1927	7,3	0,88±0,17	12,2
Дальневосточный регион				
Угли позднеюрского-нижнемелового возраста				
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
Угли палеоген палеоген-неогенового возраста				
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

Окончание таблицы

Угольный бассейн, месторождение	Число проб	A ^d , %	Содержание скандия, г/т	
			уголь	зола угля*
Казахстан				
Угли карбонового возраста				
Карагандинский	3	9,8	6,0±1,7	61,2
Экибастуз	41	36,1	8,3±0,4	23,0
Среднее	44	23,0	7,2±0,5	31,3
Угли юрского возраста				
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				
Угли карбонового возраста				
Нурс-Хотгор	122	18,2	3,4±0,3	18,7
Хаар-Тарвагатай	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
Угли пермского возраста				
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
Угли юрского возраста				
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
Угли мелового возраста				
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
Тургрикуурское	7	13,3	2,3±0,3	17,3
Шивэ-Ово	28	Н.о	1,3±0,4	Н.о
Чандгатай	13	21,3	11,2±3,5	52,6
Среднее	70	16,8	3,3±1,6	19,7
Иран				
Угли триас-юрского возраста				
Табасский	148	22,9	8,1±0,4	35,4
Эльбурсский	62	22,1	10,9±0,8	47,8
Северо-Хорасанский район	28	23,5	10,2±1,3	43,4
Мерагинский район	13	26,3	16,8±2,5	63,9
Кашан-Эсфаханский район	3	36,0	11,9±0,7	33,1
Среднее	254	24,0	11,6±1,4	48,3
Среднее для Азии	6114	13,1±1,1	4,3±0,4	32,8

Примечание: Н.о – не определено; * – пересчитано на золу.

гающие 0,23 %, установлены в золе углей тюменской свиты на западе Западно-Сибирской плиты. Для таких углей характерна низкая зольность, в ряде случаев не превышающая 1 %, но обычно составляющая 2...10 %. При этом содержание скандия в угле также аномально и достигает 83,6 г/т.

Наиболее высокие концентрации Sc в углях, достигающие 230 г/т, установлены в маломощном пласте 1.2 Березовского месторождения Канско-Ачинского бассейна [5]. Однако из-за повышенной зольности в золе угля его содержание составляет лишь 870 г/т. Аномально скандиеносны и угли Иркутского бассейна. Здесь его содержание в ряде случаев превышает 40 г/т при концентрации в золе угля 300...500 г/т. Ранее были отмечены повышенные уровни накопления Sc в углях и золах углей Азейского месторождения этого бассейна [6]. Аномально скандиеносные угли юрского возраста отмечаются и в северо-восточной части обширной области угленакопления в мезозое – в северной части Ленского бассейна [7]. Известны они и в угольных месторождениях триас-юрского возраста в Иране [8, 9]. Менее характерны они для Монголии. Но и здесь встречаются отдельные месторождения, существенно обогащенные скандием (месторождения Баянтег, Шарынгол). Обогащенные Sc угли установлены также среди угленосных формаций палеоген-неогенового возраста. Это месторождения и бассейны Сибири и Дальнего Востока России (Бикинское месторождение, Сахалинский бассейн). Во всех случаях высокие концентрации скандия приурочены к районам со значительным распространением в составе области питания угленосного бассейна пород базитового ряда, геохимически специализированных на Sc.

Распределение скандия в вертикальном разрезе угольных бассейнов, месторождений и угольных пластов также довольно неоднородно. 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 [1]. В Кузбассе, где изучен полный разрез угленосных отложений, верхи и основание балахонской и кольчугинской серий отчетливо обогащены скандием на фоне их средних частей. То же относится и к угленосному разрезу Канско-Ачинского бассейна [5].

Еще более дифференцировано распределение Sc в вертикальном разрезе отдельного угольного пласта. Подобно другим углефильным элементам, скандий отчетливо обогащает приконтактные зоны угольных пластов: участки вблизи кровли и подошвы пласта. Содержание скандия на этих участках пласта может отличаться от внутренних зон более чем на порядок.

Изучение современных торфяников показывает, что формирование приконтактных зон обога-

щения начинается еще на стадии торфонакопления. Отсутствие прямой связи с зольностью угля указывает на гидрогенную природу этих приконтактных аномалий.

Необходимо отметить, что приконтактные зоны накопления скандия установлены не во всех исследованных угольных разрезах, но, безусловно, преобладают. 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 Sc 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. При этом в разрезе одной торфяной залежи приподошвенные участки, обогащенные скандием, чередуются с участками, где такого обогащения не установлено, или оно слабо контрастно.

Мощность приконтактных (прикровельной и приподошвенной) зон повышенных концентраций скандия не зависит от мощности угольного пласта и обычно составляет 10...15 см. Это обстоятельство обуславливает известную закономерность, установленную для германия, – более высокое среднее содержание металла в маломощных пластах по сравнению с мощными [10, 11]. Объясняется это большей долей обогащенных приконтактных интервалов в разрезе маломощных пластов по сравнению с более мощными пластами. В пластах, мощность которых не превышает 20...30 см, прикровельная и приподошвенная зоны обогащения, распространяясь навстречу друг другу, нередко перекрываются и формируют в целом аномально обогащенный скандием пласт. В отдельных случаях содержание скандия в золе угля таких пластов может достигать 0,1...0,2 %. Следовательно, при прочих равных условиях, чем меньше мощность угольного пласта, тем выше в нем среднее содержание скандия. Подтверждением этому является установленная значимая отрицательная корреляционная связь между мощностью угольного пласта и средним содержанием скандия в угле и золе угля. В частности, для аномально скандиеносных углей Западно-Сибирского бассейна коэффициент корреляции между содержанием скандия и мощностью пласта для 49 пласто-пересечений составляет $-0,31$.

Факторы, контролирующие накопление скандия в углях

Среди множества факторов, определяющих уровни накопления и закономерности распределения скандия в угольных пластах, ведущее значение имеет состав области питания бассейна угленакопления (фактор петрофонда по Я.Э. Юдовичу [12]), фациальный фактор, гидрогеохимический фактор и фактор угольного метаморфизма.

Фактор петрофонда

Анализ геологического положения скандиеносных углей указывает на их связь с районами, содержащими обогащенные Sc породы (геохимически специализированные комплексы), главным образом базитового ряда. Это, в первую очередь, Западно-Сибирский бассейн, особенно его зауральская часть со средним содержанием Sc 16 г/т в угле и 150 г/т в золе. К таким бассейнам относятся Сахалинский, Минусинский и Иркутский бассейны и ряд месторождений Монголии (Баянтег, Шарынгол и Чандган Тал). 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 [13, 14] 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 корам выветривания [15]. Скандиеносные угли Минусинского бассейна также отчетливо приурочены к блокам структур обрамления с широким развитием в них фемических структурно-формационных комплексов [1].

Таким образом, во всех случаях аномального или просто повышенного содержания скандия в углях и золах углей прослеживается их связь со специализированными комплексами в обрамлении угольных месторождений и бассейнов. Следовательно, петрофонд области питания бассейна угленакопления является ведущим фактором, определяющим уровни накопления скандия в угольных месторождениях.

Фациальный фактор

Фациальный фактор также играет важную роль в формировании геохимического фона угольных пластов. Более высокие исходные содержания скандия, так же, как и повышенная зольность, характерны для углей, сформировавшихся из низинных торфяников. Низинный торф обогащен скандием по сравнению с верховым [16]. При этом золы верхового торфа обогащены скандием относительно низинного торфа, так же, как и золы малозольных углей по отношению к углям с повышенной зольностью. Это позволяет утверждать, что значительная часть скандия накапливается в углях еще на торфяной стадии. Кроме того, установлено, что при близкой зольности торфа содержания скандия в залежи могут различаться весьма существенно,

что указывает на важную роль фактора петрофонда и, возможно, гидрогеохимического фактора в накоплении металла в торфе, а следовательно, и в образованном из него угле.

Гидрогеохимический фактор

Гидрогеохимический фактор является определяющим для накопления скандия в углях наравне с фактором петрофонда. Скандий плохо растворяется в условиях зоны гипергенеза и слабо переносится в поверхностных водах. Среднее содержание Sc в поверхностных пресных водах составляет лишь 0,004 мкг/л [17]. 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 мкг/л. В болотных водах содержание Sc часто значительно выше. Так, воды из канала осушительной системы Васюганского болота в Западной Сибири содержат 0,18 мкг/л Sc [18]. В подземных и грунтовых водах содержание скандия выше, чем в поверхностных. Концентрация скандия в подземных и грунтовых водах зоны гипергенеза зависит от климатических особенностей. Наиболее высока она в водах горно-таежных областей и составляет в среднем 0,08 мкг/л [17]. В современных кислых шахтных водах Кизеловского бассейна (pH = 2–4) его концентрация достигает 45 мкг/л [19], почти в 10000 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 [17]. Это согласуется с данными о высоком содержании скандия в болотных водах. Предполагается, что скандий мигрирует в этих условиях в форме растворимых органических комплексов.

Характер распределения скандия в угольном пласте указывает на накопление его из водных растворов на границе угольного пласта (торфяной залежи). Низкая миграционная способность скандия 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. Содержание скандия в углевмещающих толщах и особенности гидрогеохимии бассейна определяют возможность надфоновое его накопления в углях. Аномальные по содержанию скандия угольные месторождения и бассейны отличаются повышенными в 1,5–3 раза по сравнению с кларком содержаниями скандия в углевмещающих породах.

Фактор метаморфизма

Роль этого фактора заключается в том, что в процессе угольного метаморфизма изменяется содержание скандия в углях в результате его перераспределения и выноса. На вынос скандия при метаморфизме указывают результаты сопоставления его содержания в углях разных марок. Факт выноса

не всегда однозначен, так как содержание металла в углях зависит от многих факторов. 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 [20]. Здесь отчетливо видно уменьшение содержания скандия от углей марки Д к антрацитам. Эти данные хорошо коррелируют с данными изучения угленосного разреза г. Алан (Альберта, Канада) [21] и с данными по Табасскому бассейну (центральный Иран). Таким образом, региональный метаморфизм углей приводит к потере скандия.

Еще более контрастен вынос 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 [15].

Природа аномальных содержаний скандия в углях

Происхождение аномальных содержаний скандия в углях не обсуждалось так активно, как природа германиеносных углей, но лишь потому, что этот металл не привлекал к себе столь пристального внимания, а потому не изучался так же детально, как Ge. Для понимания природы формирования скандиеносных углей необходимо решение все тех же вопросов обоснования источников металла, способов его переноса и механизмов концентрирования, которые решались при изучении природы германиеносных углей, но в еще более сложном варианте, так как миграционная способность скандия в условиях зоны гипергенеза ниже, чем у германия. В связи с этим классическая модель, применяемая для германия в углях и предусматривающая выщелачивание металла из пород обрамления бассейна угленакопления в процессе формирования коры выветривания, его перенос в растворенной форме или во взвешенном состоянии и отложение в условиях торфяных болот может быть принята для скандия с большим числом оговорок. *Во-первых*, скандий, в силу особенностей химических свойств, как и алюминий, обладает слабой подвижностью в коре выветривания [22]. *Во-вторых*, эти же свойства обуславливают низкие содержания Sc в поверхностных и грунтовых водах, в связи с чем накопление его из таких вод в результате сорбции в торфе или угле в аномальных концентрациях представляется маловероятным. Особенно это актуально для маломощных пластов малозольных углей, сформировавшихся из верховых торфяников. Известно, что наиболее высокие содержания скандия, достигающие 0,1...0,2 %, в золе установлены в маломощных пластах угля с низкой зольностью [7, 15, 23, 24], обычно не превышающей 5 %, а часто составляющей 1...3 %. При этом аномальны не только золы углей, но и сами угли, содержащие до

50...80 г/т Sc. Учитывая механизм питания верховых торфяников, из которых по устоявшимся представлениям формировались маломощные пласты малозольных углей, такое аномальное обогащение Sc невозможно объяснить накоплением его на стадии торфонакопления из пылеаэрозолей или ультрапресных атмосферных осадков.

В связи с этим более правдоподобной представляется модель накопления скандия в углях, исключая ведущее значение его переноса из коры выветривания в угольный пласт в растворенном состоянии либо накопление в углях в виде тонкой взвеси. Водный перенос предполагает поиск механизмов его транспортировки, а поступление в угольный пласт в виде взвеси предполагает высокую зольность аномально скандиеносных углей. В то же время известны высокие содержания скандия в болотных водах [18]. Особенность болотных вод – значительное количество органического вещества, в том числе гуминовых и фульвокислот. Так, современные болотные воды Западно-Сибирской плиты содержат 25...165 мг/л органических кислот [25]. Основная их доля приходится на фульвокислоты и гуминовые кислоты. Например, в водах Тимирязевского болота на юге Западно-Сибирской плиты содержится 154 мг/л фульвокислот и 34 мг/л гуминовых кислот [26]. Вероятно, именно с наличием органических кислот связана миграция Sc в водах областей торфо (угле) накопления и его поступление в угольный пласт. При наличии в области угленакопления таких вод нет необходимости обосновывать дальний транспорт Sc от области сноса до угольного пласта в водных растворах. Более вероятен перенос и отложение обогащенных Sc минералов в кластогенной форме в углевмещающих толщах, а затем переход в раствор в форме гуматов или фульватов и переотложение в угольном пласте. Отчасти это происходит на стадии торфообразования, на что указывает наличие контрастных зон обогащения в приподошвенной части и слабоконтрастных – в верхней части торфяных массивов [15]. Содержание Sc в приподошвенной зоне современных торфяников Западной Сибири достигает 100 г/т. Эти данные согласуются с выводами Я.Э. Юдовича [27] о преимущественном накоплении скандия на стадии торфонакопления.

Формирование зон обогащения, по-видимому, продолжается и на стадии диагенеза. Верхняя зона обогащения в значительной мере может формироваться во время погребения торфяника под терригенными отложениями и позднее при диагенезе, а также в процессе углефикации за счет перераспределения Sc при повышенных температурах (100...200 °С) по механизму, рассмотренному в работе [28]. Подтверждением этой модели формирования скандиеносных углей служат следующие установленные закономерности:

- 1) Отрицательная корреляция содержания скандия в золе угля с зольностью и незначимая связь между содержанием Sc в угле и зольностью. Это указывает на отсутствие зависимости между на-

- коплением в угле терригенной золы и содержанием скандия. Следовательно, терригенный материал, поступающий в торфяную залежь, не является главным фактором накопления аномально высоких содержаний Sc в угольных пластах.
- 2) Угли с аномальными и повышенными содержаниями скандия установлены лишь в бассейнах и месторождениях, где область питания бассейна угленакопления богата скандиеносными породами (преимущественно породы габбро-базальтового ряда). Характерными примерами являются угольные месторождения западной части Западно-Сибирского бассейна, расположенные вблизи Урала, Минусинского и Иркутского бассейнов, о. Сахалин, отдельные месторождения Монголии и Казахстана. Это указывает на важную роль общей геохимической специализации на Sc районов распространения скандиеносных углей.
 - 3) В угольном пласте распределение скандия типично для углефильных элементов, а именно, Sc обогащены приконтактовые участки пласта (прикровельная и приподошвенная). Это указывает на преимущественно водородный механизм накопления Sc в угольном пласте. При этом прикровельная зона угольных пластов чаще более обогащена скандием, чем приподошвенная, тогда как в торфяных залежах наблюдается обратная картина. Это указывает на возможное перераспределение Sc в процессе углефикации в диагенезе и катагенезе уже после формирования торфяной залежи.
 - 4) Установлена отрицательная корреляция содержания Sc в золе угля с мощностью угольного пласта. Для 49 пластопересечений Западно-Сибирского бассейна коэффициент корреляции составляет $-0,31$. Наряду с данными об обогащении скандием приконтактовых участков пласта, этот факт указывает на водородный механизм его концентрирования.
 - 5) В торфе и в буром угле скандий концентрируется в органическом веществе в основном в форме гуматов или фульватов [1]. Такие формы нахождения образуются при участии водных растворов по обменному механизму.
 - 6) Обогащенные скандием угольные пласты в бассейнах угленакопления обычно соседствуют с углевымещающими породами, характеризующи-

мися повышенным фоном скандия [1, 24, 29], в среднем в 1,5–2,5 раза превышающим его кларк для земной коры. Вероятно, эти породы и являются источником Sc для формирования его аномалий в углях. Для выщелачивания скандия из таких пород, его транспортировки и концентрирования в угольных пластах необходима благоприятная гидрогеологическая обстановка и гидрогеохимические условия. Такие условия характерны для современных болотных систем и могли быть реализованы в древних бассейнах торфо (угле) накопления.

Заключение

В различных районах азиатской части России, Монголии, Казахстана и Ирана выявлен ряд угольных месторождений, аномально обогащенных скандием вплоть до промышленно значимых концентраций. Особенности распределения Sc в месторождениях и угольных пластах и формы его нахождения указывают на преимущественно водородный механизм накопления аномальных его концентраций в углях и торфах. Состав пород обрамления и гидрогеохимические условия бассейнов и месторождений определяют уровни накопления Sc в углях. Все обогащенные им угольные месторождения приурочены к геохимически специализированным блокам горных пород, насыщенным базитовыми комплексами с повышенным содержанием Sc. Предполагается, что накопление скандия в углях и торфах обусловлено его выщелачиванием из углевымещающих пород и переотложением в угольный (торфяной) пласт с участием грунтовых и подземных вод, обогащенных органическими кислотами. Для накопления в углях высоких концентраций Sc необходимы условия для формирования углевымещающих пород, обогащенных скандием, и условия для его выщелачивания и транспортировки в угольный пласт. Такие условия существуют в современных болотных системах Западной Сибири и могли реализоваться в древних бассейнах торфо (угле) накопления.

Возможность реализации такой модели формирования аномально скандиеносных углей подтверждается характером распределения Sc в угольном пласте, установленными фактами высокого его содержания в торфяных и кислых подземных водах, а также его способностью создавать устойчивые комплексы с гуминовыми и фульвокислотами [30].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арбузов С.И., Ершов В.В. Геохимия редких элементов в углях Сибири. – Томск: Изд. дом «Д-Принт», 2007. – 468 с.
2. 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.
3. Finkelman R.B. Trace and minor elements in coal // *Organic Geochemistry* / ed. by M.N. Engel, S.A. Macko. – NY: Plenum Press, 1993. – P. 593–607.
4. Ketrís 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. – V. 78. – № 2. – P. 135–148.
5. Арбузов С.И., Волостнов А.В., Ершов В.В., Рихванов Л.П., Мионов В.С., Машенькин В.С. Геохимия и металлоносность углей Красноярского края. – Томск: СТТ, 2008. – 300 с.
6. Крюкова В.Н., Вязова Н.Г., Латышев В.П. Распределение скандия в веществе углей Восточной Сибири // *Химия твердого топлива.* – 2001. – № 3. – С. 73–76.
7. Каширцев В.А., Зуева И.Н., Сукнев В.С., Митронов Д.В., Сюндюков Ш.А., Андреева Г.В., Капышева Г.И., Лившиц С.Х., Попов В.И. Парагенетические ассоциации редкоземельных

- элементов в мезозойских углях северной части Ленского бассейна // Отечественная геология. – 1999. – № 4. – С. 65–68.
8. Yazdi M., Esmailinia S.A. Geochemical properties of coals in the Lushan coal field of Iran // Int. J. Coal Geol. – 2004. – V. 60. – P. 73–79.
 9. Goodarzi F., Sanei H., Stasiuk L.D., Bagheri-Sadeghi H., Reyes J. A preliminary study of mineralogy and geochemistry of four coal samples from northern Iran // Int. J. Coal Geol. – 2006. – V. 65. – P. 35–50.
 10. Ломашев И.П., Лосев Б.И. Германий в ископаемых углях. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – 258 с.
 11. 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.
 12. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Неорганическое вещество углей. – Екатеринбург: УрО РАН, 2002. – 422 с.
 13. 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: Межвузовский научн. темат. сб. – Екатеринбург: Изд-во Уральского гос. горного ун-та, 2009. – Вып. III (19). – С. 45–56.
 14. 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: Межвузовский научн. темат. сб. – Екатеринбург: Изд-во Уральского гос. горного ун-та, 2011. – Вып. V (21). – С. 84–89.
 15. Арбузов С.И., Волостнов А.В., Ильенок С.С., Рыбалко В.И. Природа тонштейнов Азейского месторождений Иркутского угольного бассейна // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 1. – С. 89–97.
 16. 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 // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 1. – С. 44–48.
 17. Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. – М.: Недра, 1998. – 366 с.
 18. Савичев О.Г. Реки Томской области: состояние, использование и охрана. – Томск: Изд-во ТПУ, 2003. – 202 с.
 19. 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. – 1966. – № 8. – С. 21–23.
 20. 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.
 21. Goodarzi F., Cameron A.R. Distribution of major, minor and trace elements in coals of the Kootenay Group, Mount Allan, Alberta // Can. Miner. – 1987. – V. 25. – P. 555–565.
 22. Стряпков А.В. Сорбция скандия и РЗЭ как причина их накопления в корках выветривания // Геохимия. – 1997. – № 9. – С. 930–936.
 23. Середин В.В., Арбузов С.И., Алексеев В.П. Скандиеносные угли Яхлинского месторождения, Западная Сибирь // Доклады РАН. – 2006. – Т. 409. – № 5. – С. 677–682.
 24. 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.
 25. Shvartsev S.L., Serebrennikova O.V., Zdvizhkov M.A., Savichev O.G., Naimushina O.S. Geochemistry of Wetland Waters from the Lower Tom Basin, Southern Tomsk Oblast // Geochemistry International. – 2012. – V. 50. – № 4. – P. 367–380.
 26. Савичев О.Г., Шмаков А.В. Вертикальная зональность и внутригодовые изменения химического состава вод Тимирязевского болота (Томск, Западная Сибирь) // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – № 1. – С. 156–161.
 27. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Ценные элементы-примеси в углях. – Екатеринбург: УрО РАН, 2006. – 538 с.
 28. Иванкин П.Ф., Труфанов В.Н. Об углеводородной флюидизации ископаемых углей // Докл. АН СССР. – 1987. – Т. 292. – № 5. – С. 1214–1216.
 29. Ескенази Г. Скандий в болгарских углях // Годишник Софийского ун-та. Геол.-геогр. факультет. Кн. 1. Геология. – 1996. – Т. 89. – С. 205–217.
 30. Комиссарова Л.Н. Неорганическая и аналитическая химия скандия. – М.: Эдиториал УРСС, 2006. – 512 с.

Поступила 01.04.2013 г.