

УДК 553.94:550.4

Р.Р. Хасанов¹, А.Ф. Исламов², А.Х. Богомолов³**РЕДКОЗЕМЕЛЬНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ В РАННЕКАРБОНОВЫХ УГЛЯХ ВОЛГО-УРАЛЬСКОГО РЕГИОНА⁴**

Проанализировано содержание лантаноидов в углях нижнекаменноугольных залежей на территории Волго-Уральского региона с использованием ИСП-спектрометрии. Установлены основные закономерности распределения редкоземельных элементов (РЗЭ), которые выражены в преобладании легких лантаноидов над тяжелыми, рассмотрена роль карбонатных толщ в обрамлении угольных залежей в концентрации РЗЭ и природа их геохимических аномалий, выявлены некоторые формы нахождения РЗЭ в веществе углей.

Ключевые слова: ископаемые угли, редкоземельные элементы, неорганическое вещество углей, формы нахождения элементов, сканирующая электронная микроскопия, рентгеновский микроанализ.

The analysis of lanthanides in the Early Carboniferous coal deposits in the Volga-Ural region using ICP-spectrometry was proceeded. The main regularities of the distribution of rare earth elements (REE), which are expressed in the predominance of light lanthanides over heavy lanthanides, examined the role of carbonate strata framing coal deposits in the REE concentration and the nature of their geochemical anomalies, some forms of occurrence of REE in coal substance are identified.

Key words: fossil coal, rare earth elements, inorganic matter coals, forms of finding of elements, scanning electron microscopy, X-ray microanalysis.

Введение. В последние годы существенно возрос интерес к элементам группы редких земель (РЗЭ) как ценному сырью. В связи с этим одна из важнейших задач — выяснение причин и условий их накопления, в том числе в промышленных концентрациях, в различных геологических образованиях. РЗЭ подвергаются разделению в ходе осадочных процессов [Балашов, 1961; Минеев, 1969]. Среди осадочных пород к крупнейшим концентраторам РЗЭ относятся ископаемые угли, которые в ряде месторождений представляют собой ценное комплексное сырье. Угли состоят из множества органических и минеральных фаз, это многокомпонентная система с многостадийной историей формирования. По физико-химическим свойствам (кислая среда, восстановительная обстановка) угли сильно контрастируют с окружающими породами и часто выступают в качестве геохимических барьеров для мигрирующих в растворах металлов. Как показано во многих исследованиях [Винокуров и др., 2002; Копорулин и др., 2009; Середин, 2001, 2004; Seredin, Shifeng Dai, 2012; Wang et al., 2003], накопление РЗЭ в углях может происходить на всех стадиях их формирования. Механизмы и формы локализации РЗЭ в углях до настоящего времени изучены недостаточ-

но, что во многом связано с объективными трудностями исследования их вещества. Развитие аналитических методов значительно расширяет возможности изучения вещества углей и определения форм нахождения РЗЭ.

К слабоисследованным в отношении РЗЭ относятся угольные залежи Волго-Уральского региона, выявленные в результате геолого-разведочных работ на нефть в визейских отложениях [Угольная база..., 2000; Хасанов, Ларочкина, 2013]. В настоящее время угольные ресурсы региона (Камский угольный бассейн) по объективным причинам (большая глубина и сложные горно-геологические условия залегания) не востребованы экономикой. В то же время только в пределах Татарстана они составляют около 3,5 млрд т, что сопоставимо с запасами нефти в регионе и позволяет предположить их освоение в обозримом будущем. По основным характеристикам рассматриваемые угли близки к одновозрастным углям Подмосковского и Кизеловского бассейнов. Авторами были исследованы концентрация, формы нахождения и особенности локализации РЗЭ в углях Волго-Уральского региона, центральную часть которой занимает Республика Татарстан.

¹ Институт геологии и нефтегазовых технологий Казанского (Приволжского) федерального университета, докт. геол.-минерал. н., зав. кафедрой региональной геологии и полезных ископаемых; *e-mail:* rinat.khassanov@kpfu.ru

² ЗАО Шлюмберже Лоджелко ИНК, канд. геол.-минерал. н., геолог; *e-mail:* albert.f.islamov@gmail.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих полезных ископаемых, канд. геол.-минерал. н., доцент; *e-mail:* nvrgoncl@geol.msu.ru

⁴ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 12-05-97028) и за счет субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

Материалы и методы исследований. Геологическая характеристика. Основные угленосные образования на территории Татарстана, которые по мощности пластов и размерам залежей могут представлять промышленный интерес, связаны с радаевско-бобриковскими отложениями визейского яруса [Угольная база..., 2000; Хасанов, Ларочкина, 2013]. Мощность пласта «Основной» варьирует от 1 до 29 м, достигая 40 м (залежь Красно-Ярская). В соответствии с современной стратиграфией карбона [Геология Татарстана..., 2003] визейская формация включает (снизу вверх) косьвинский (в объеме выделявшихся ранее верхнеелховских отложений), радаевский, бобриковский и тульский горизонты. Верхняя стратиграфическая граница представлена карбонатными породами алексинского горизонта визейского яруса, нижняя — карбонатными породами кизеловского горизонта турнейского яруса. Схема распространения визейских угольных залежей на территории Татарстана представлена на рис. 1.

Угленосные отложения визейского яруса с несогласием залегают на органогенных морских известняках турнейского возраста, заполняя углубления на их поверхности, и представляют собой терригенную формацию платформенного типа со сложным фациальным и литологическим составом. Литолого-фациальный состав угленосной формации может меняться в зависимости от характера палеорельефа размытой поверх-

ности подстилающих турнейских отложений. Визейская угленосная формация сложена песчаниками, алевролитами, аргиллитами, известняками, доломитами, углистыми аргиллитами и ископаемыми углями, достигшими каменноугольной стадии метаморфизма (ранний катагенез). Мощность угленосной толщи во врезях составляет в основном 40–90 м и редко превышает эти значения.

Своеобразие визейских углей обусловлено совокупностью условий их формирования и постседиментационного преобразования. Визейские угли по природному типу гумусовые. В визейских углях преобладают четыре основных литотипа — матовый дюреновый, полуматовый кларено-дюреновый, полублестящий дюрено-клареновый и блестящий клареновый. По классификации И.Э. Вальца они соответствуют фюзинито-липоидолитам, гелито-фюзинито-микстогумолитам и липоидо-фюзинито-гелититам. По марочному составу они относятся к каменным (марка Д), участками к бурым (ЗБ). Угли характеризуются невысокой зольностью (15–26%), содержание серы в углях варьирует от 1,49 до 10,22%. В составе золы преобладают оксиды кремния и алюминия (в среднем 48,90 и 39,73% соответственно) [Угольная база..., 2000]. Минеральное вещество представлено преимущественно каолинитом, в подчиненном количестве встречаются кварц, альбит, кальцит, пирит и др. [Хасанов и др.,

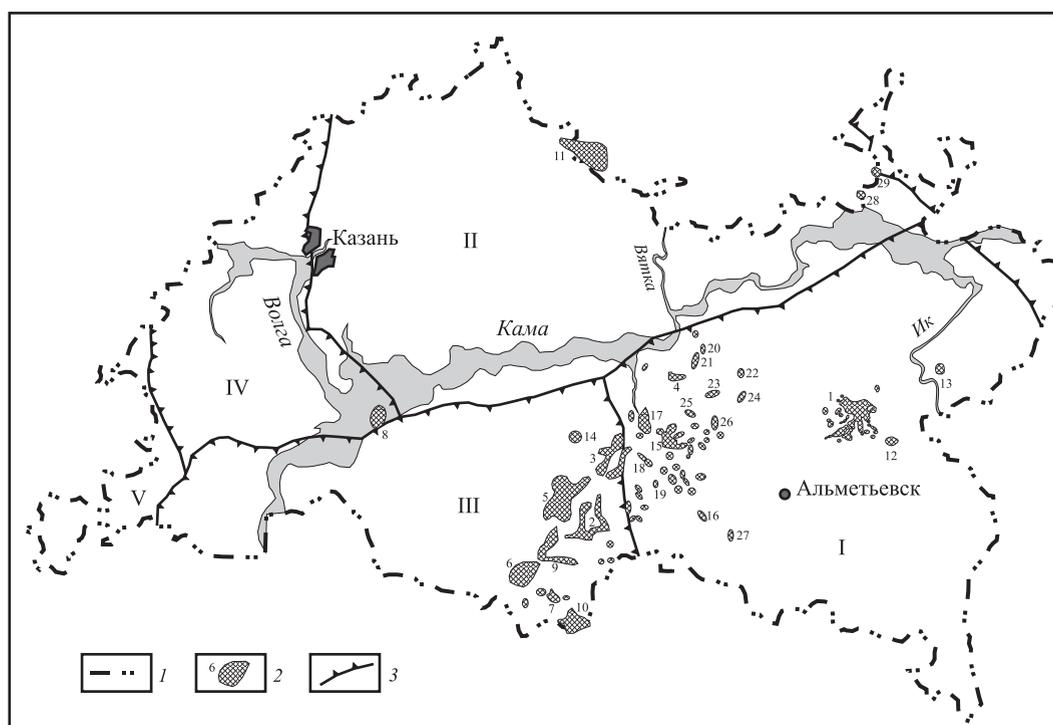


Рис. 1. Схема размещения визейских залежей угля на территории Республики Татарстан: 1 — административные границы; 2 — залежи угля; 3 — границы тектонических элементов (I — Южно-Татарский свод, II — Северо-Татарский свод, III — Мелекесская впадина, IV — Казанско-Кировский прогиб, V — Токмовский свод, VI — Верхнекамская впадина); 1–29 — залежи угля: 1 — Ташлиярская группа, 2 — Мокшинская, 3 — Черемуховская-1, 4 — Южно-Уральминская, 5 — Богородская, 6 — Черноозерская, 7 — Егоркинская, 8 — Пичкасская, 9 — Сунчелевская, 10 — Южно-Нурлатская, 11 — Кукморская, 12 — Азнакаевская, 13 — Муслумовская, 14 — Тугаевская, 15 — Рокашевская, 16 — Беркет-Ключевская, 17 — Усть-Кичуйская, 18 — Паймулкинская, 19 — Южно-Гагаринская, 20 — Сухаревская, 21 — Янушинская, 22 — Шипкинская, 23 — Киевская, 24 — Уральминская, 25 — Федоровская, 26 — Южно-Соколинская, 27 — Урмыш-линская, 28 — Варзи-Омгинская, 29 — Красно-Ярская

2013]. Угли содержат локальные геохимические аномалии и повышенные концентрации редких элементов, в том числе редкоземельных [Хасанов, 2006; Хасанов и др., 2010].

Состав визейских углей тесно связан с составом окружающих пород и условиями визейского осадконакопления [Хасанов, 2006]. Торфо- и углеобразование происходило в паралической обстановке на пассивной платформенной окраине в условиях гумидного климата. Древние торфяники локализованы в изолированных эрозионно-карстовых врезках на поверхности турнейской карбонатной толщи [Угольная база..., 2000]. На прилегающих к торфяникам водосборах протекали латеритные процессы. Минеральное питание торфяников отличалось однообразием. На большей части обрамляющей эрозионно-карстовые депрессии территории преобладали преимущественно карбонатные отложения. С приподнятых участков Северо- и Южно-Татарского сводов, представлявших собой сушу, в эрозионно-карстовые врезки происходил снос обломочного материала, за счет которого формировалась визейская угленосная толща. Она имеет терригенный состав и сложена преимущественно кварцевыми и олигомиктовыми песчаниками, алевролитами и аргиллитами (в том числе углестыми). Главные минералы песчаников — кварц, полевые шпаты, мусковит, каолинит, кальцит, в тяжелой фракции встречаются рудные минералы, турмалин, циркон, лейкоксен, анатаз, реже эпидот, рутил, гранат, хлорит, ставролит, корунд, апатит. Состав терригенных минералов устойчив и хорошо отсортирован, что указывает на многократное переотложение исходного обломочного материала.

Авторами исследовано неорганическое вещество визейских углей Волго-Уральского региона. Изучены расположенные на территории Республики Татарстан угольные залежи, вскрытые в результате геологоразведочных работ на нефть. Всего по керну нефтяных скважин опробовано 18 угольных залежей. Опробование угольных пластов проводили с интервалом 0,1–0,2 м. Впервые в визейских углях Волго-Уральского региона изучено содержание полного комплекса лантаноидов. Содержание РЗЭ определяли в золе углей при помощи ИСП-спектроскопии в лаборатории научно-исследовательского института ФГУП «ЦНИИгеолнеруд» (г. Казань) на спектрометре «ОРТИМА» 2000 DV.

Состав минерального вещества углей изучали стандартными оптико-микроскопическими методами в проходящем и отраженном свете с использованием результатов рентгенофазового анализа, а также с применением электронно-микроскопического анализа («Carl Zeiss» EVO GM) с рентгеновским микроанализатором на основе энергодисперсионного спектрометра («Bruker» X275HR). Для электронно-микроскопических исследований пробоподготовка заключалась в напылении на обломки углей проводящего электронного слоя. Для этого использовали золото (вакуумный напылитель «Quorum» Q 150R ES). Подобное напыление эффективно отводит электрический заряд от

образца и не дает нежелательной примеси золота на спектрах химического состава. В результате установлены основные закономерности распределения и некоторые формы нахождения редкоземельных элементов в углях Волго-Уральского региона.

Результаты исследований и их обсуждение. Авторами выявлены основные закономерности и особенности концентрации РЗЭ в углях Волго-Уральского региона. В целом для углей Камского бассейна характерно преобладание легких лантаноидов над тяжелыми (таблица). Усредненное по бассейну значение соотношения La/Yb значительно превышает единицу. Однако если рассматривать отдельные залежи, могут наблюдаться существенные вариации этого параметра, в том числе и в зависимости от положения пробы в профиле пласта. Разброс значений в разных угольных залежах для отдельных элементов достигает 2–3 порядков. Ярко выраженное преобладание легких лантаноидов над тяжелыми отмечено в большей части угольных залежей, расположенных в южной части бассейна (Южно-Татарский свод и восточный борт Мелекесской впадины). Отношение La/Yb здесь может многократно превышать единицу, достигая десятков и сотен. В то же время в некоторых проанализированных пробах этот параметр равен единице или варьирует около нее, что указывает на преимущественное накопление в ряде залежей (и их участков) средних лантаноидов. Распределение РЗЭ в пределах залежей характеризуется увеличением их концентрации в приконтактных участках пластов [Хасанов, 2006; Хасанов и др., 2010], где иногда отмечены их геохимические аномалии.

Важная особенность распределения РЗЭ в исследуемых углях — повышенная, иногда аномальная концентрация церия в приконтактных участках пластов. Содержание Се в Сунчелевской залежи в отдельных пробах достигает 190 г/т в золе (A^d 17,2%). В высокозольных контактных участках его содержание увеличивается (зафиксировано локальное значение 630 г/т в золе при зольности углистой породы 72,1%). Причина высокой концентрации и аномалий церия в углях заключается в смене рН-условий на контакте угля (кислая среда) с вмещающими породами (щелочная среда) и свойствах самого церия. В щелочной среде трехвалентный церий окисляется до четырехвалентного и легко растворяется в водной среде, а в кислой среде, наоборот, соединения четырехвалентного церия малоустойчивы, он осаждается на органическом веществе или в минеральной форме [Балашов, 1961; Юдович и др., 1985; Редкие элементы..., 2000].

Подземные воды визейской терригенной толщи находятся под сильным влиянием окружающих их легкокарстующихся карбонатных отложений (известняки и доломиты) и обладают преимущественно щелочными свойствами. Мобилизация РЗЭ происходит в основном из визейских известковистых олигомиктовых песчаников и турнейских карбонатных пород. Фоновое содержание РЗЭ в последних невысокое. Однако, принимая во внимание масштабы выщела-

Содержание и индикаторные соотношения РЗЭ в углях и углистых породах

Залежь	Ad, %	Содержание в золе, г/т															Y	La/Yb
		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Сумма Ln		
Беляковская	17,6	26,00	61,00	14,00	32,00	8,70	1,10	0,20	0,70	3,40	0,50	2,00	0,12	0,66	0,08	150,46	13,00	39
Мокшинская	62,31	20,00	51,00	12,00	26,00	5,70	0,66	2,10	0,22	0,74	0,06	1,80	0,04	0,08	—	120,42	1,30	250
Мокшинская	28,3	1,40	3,20	0,78	1,60	0,39	—	0,25	—	0,17	—	4,60	—	—	—	12,39	0,75	—
Сунчелеевская	72,1	270,00	630,00	160,00	280,00	53,00	7,00	28,00	3,70	12,00	1,40	5,70	0,34	1,70	0,19	1453,03	31,00	159
Сунчелеевская	11,3	9,60	18,00	5,10	10,00	2,10	0,29	1,40	0,14	0,67	0,07	6,30	0,11	0,11	—	53,89	1,80	87
Сунчелеевская	23,3	28,00	83,00	27,00	65,00	13,00	2,00	6,70	0,86	3,30	0,43	11,00	0,19	0,51	0,05	241,04	9,00	55
Сунчелеевская	17,2	99,00	190,00	45,00	60,00	12,00	1,90	8,10	1,00	3,90	0,44	1,50	0,16	0,33	0,05	423,38	8,20	300
Егоркинская	37,9	21,00	45,00	12,00	22,00	4,40	0,73	2,40	0,30	1,20	0,14	4,00	0,05	0,18	—	113,40	3,00	117
Егоркинская	7,64	26,00	55,00	20,00	43,00	8,90	1,60	5,70	0,83	3,20	0,45	3,90	0,38	0,41	—	169,37	0,81	63
Егоркинская	72,8	54,00	120,00	35,00	76,00	15,00	2,80	10,00	1,50	6,00	0,94	3,20	0,47	1,10	0,10	326,11	20,00	49
Черемшанская	20,50	23,00	39,00	12,00	22,00	4,10	0,71	2,60	0,40	1,50	0,23	1,90	0,12	0,33	—	107,89	5,1	69

Примечание. Прочерк — значения ниже порога обнаружения.

чивания, можно предположить, что объем растворенных РЗЭ (в том числе церия) был достаточно велик, чтобы создавать заметные накопления в краевых слоях угольных пластов, которые выступали в качестве геохимических барьеров. Приуроченность множества цериевых геохимических аномалий к приконтактовым участкам пластов указывает на наложенный (постседиментационный) характер их образования. Высокозольные прослои внутри угольного пласта характеризуются значительно меньшей концентрацией церия, чем краевые зоны.

Формы присутствия РЗЭ в составе углей могут быть разнообразными. Большое значение для концентрации различных групп лантаноидов имеет состав минерального, и прежде всего глинистого, вещества углей. По данным [Копорулин и др., 2009], для иллитовой фракции характерно четкое преобладание тяжелой группы РЗЭ (сумма РЗЭ 150 г/т); для каолининовой фракции — обогащение легкими РЗЭ и положительная аномалия европия (сумма РЗЭ 230 г/т); полимиктовая фракция характеризуется вариациями между легкими и тяжелыми РЗЭ (сумма РЗЭ 180 г/т); смектитовой фракции присуща слабая выраженность преобладания одной из групп РЗЭ (сумма РЗЭ 73 г/т). Такое распределение РЗЭ объясняется разной сорбционной способностью глинистых минералов. В визейских углях основная масса минерального вещества представлена каолинитом, который способствует концентрации легких РЗЭ. С каолинитом следует связывать, видимо, те РЗЭ, поступление которых происходило в период торфяной стадии в составе водного и минерального питания, это преимущественно фоновые значения содержания РЗЭ.

Электронно-микроскопическое изучение углей позволило выявить также некоторые минеральные формы нахождения РЗЭ в углях, объясняющие природу геохимических аномалий церия в приконтактовых зонах пластов. В структуре органического вещества углей под электронным микроскопом обнаружены выделения минералов РЗЭ (рис. 2) [Хасанов и др., 2013]. Микронзондовый энергодисперсионный анализ минеральных зерен показал, что главные компоненты представлены Ce, Nd, Sm, Gd, Y, C, F, O, Ca (рис. 3). В качестве примесей отмечаются также Al, Si, Cl, Th. Видимо, наблюдаемый минерал представляет собой разновидность РЗЭ-содержащих фторкарбонатов. Характер заполнения минеральными выделениями РЗЭ клеточного пространства реликтовой растительной ткани (рис. 2) дает основание говорить о более позднем формировании этого минерала относительно вещества углей.

Другая характерная особенность распределения РЗЭ по профилю визейских угольных пластов Волго-Уральского региона заключается в повышении концентрации ряда тяжелых РЗЭ в центральных участках пластов некоторых залежей. Например, содержание эрбия в Мокшинской залежи достигает 8,3 г/т в золе (A^d 22,3%) и 11 г/т в золе (A^d 23,3%) в Сунчелеевской залежи. Сведений об эрбии в углях в опубликованной литературе встречается немного. С.И. Арбузов с соавторами [Редкие элементы..., 2000] приводят его кларковое содержание в интервале 0,5–2 г/т, отмечая при этом упоминания и о более высокой концентрации. Природа концентрации эрбия в углях изучена мало. Учитывая отрицательную корреляционную связь его содержания с зольностью (–0,3) и фосфором (–0,5)

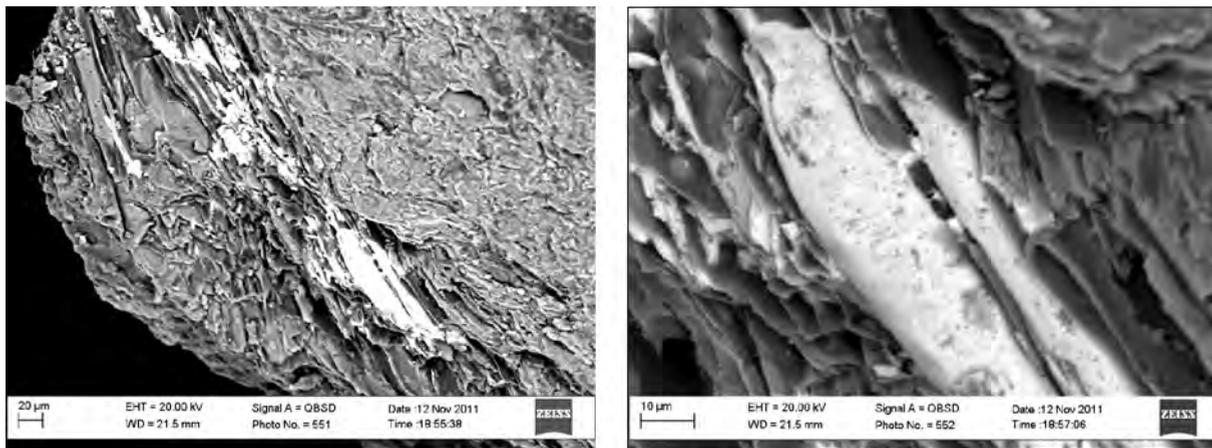


Рис. 2. Выделения минералов РЗЭ (Ивинская площадь)

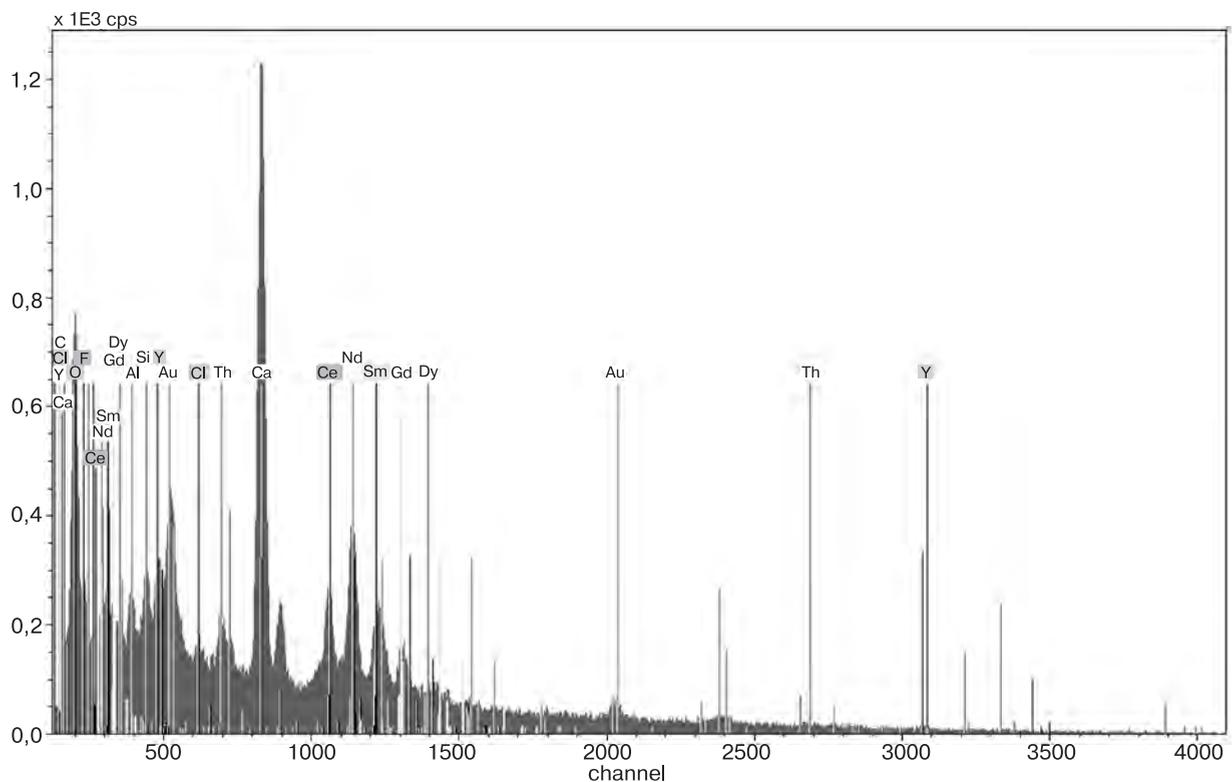


Рис. 3. Спектр энергодисперсионного элементного анализа РЗЭ минерала

в упомянутых залежах, можно предположить, что концентрация эрбия может иметь иную природу, чем у элементов цериевой группы, и быть связана с органической составляющей угля. По данным [Середин, 2004], примерно половина всех РЗЭ в углях может быть сосредоточена в гуминовом веществе.

В целом в визейских углях коэффициент корреляции РЗЭ с зольностью варьирует в широких пределах — от $-0,3$ до $0,9$, что указывает на большое разнообразие их форм нахождения. РЗЭ обнаруживают высокие корреляционные связи с фосфором ($0,3-0,6$), содержание которого в свою очередь коррелирует с величиной зольности ($0,8$). Можно предположить, что содержащиеся РЗЭ субмикроскопические

фазы минералов фосфора также являются постоянным компонентом неорганического вещества визейских углей. По данным Р. Финкельмана [Finkelman, 1980], концентраторами РЗЭ в углях служат микровключения редкоземельных фосфатов и алюмофосфатов (монацита, ксенотима, крандаллита).

Отмечена также связь РЗЭ с пиритовыми выделениями в углистых породах и высокозольных углях, которые содержат включения пирита размером от нескольких миллиметров до $1-1,5$ см и представляют собой поликристаллические агрегаты. По морфологическим признакам это псевдоморфозы по фаунистическим остаткам. Содержание РЗЭ в них в $2-3$ раза превышает таковое в углях. Связь РЗЭ с пиритом от-

мечалась неоднократно. Повышенная концентрация РЗЭ в пирите была установлена также в верхнепалеозойских углях Северного Китая [Wang et al., 2003] и золотосодержащих пиритах Жиншанского золоторудного месторождения в Китае [Mao Guangzhou et al., 2009], однако природа этого явления остается неясной. По данным [Mao Guangzhou et al., 2009], полученным на основании исследования золотосодержащих пиритов в Китае, РЗЭ в пирите могут присутствовать в составе жидких и дочерних микроминеральных силикатных включений. Выполненные нами электронно-микроскопические исследования с микрозондовым определением химического состава минеральных (в том числе пиритовых) зерен не позволили выявить в них РЗЭ или обнаружить минеральные фазы с РЗЭ в межзерновом пространстве пиритовых агрегатов.

В целом можно констатировать, что в Камском бассейне наблюдаются общие тенденции распределения РЗЭ в углях, но при этом отмечаются их существенные вариации в изолированных залежах. Распределение РЗЭ в исследованных угольных пластах чрезвычайно сложное, сильно зависит от местных условий в период формирования торфяника и геолого-гидрогеологических условий, сложившихся в постседиментационный период.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Балашов Ю.А. Геохимия редкоземельных элементов. М.: Наука, 1961. 267 с.

Винокуров С.Ф., Копорулин В.И., Стукалова И.Е. Редкие элементы в угленосных отложениях: особенности распределения и геохимическое значение // Литология и полезные ископаемые. 2002. № 5. С. 516–524.

Геология Татарстана: Стратиграфия и тектоника / Отв. ред. Б.В. Буров, Н.К. Есаулова, В.С. Губарева. М.: ГЕОС, 2003. 402 с.

Копорулин В.И., Ляпунов С.М., Середин В.В. Редкоземельные элементы в глинистой фракции угленосных отложений Аркагалинского (Магаданская область) и Долинского (о. Сахалин) месторождений угля // Литология и полезные ископаемые. 2009. № 5. С. 527–542.

Минеев Д.А. Лантаноиды в минералах. М.: Недра, 1969. 184 с.

Редкие элементы в углях Кузнецкого бассейна. Кемерово: Кемеровский полиграфкомбинат, 2000. 248 с.

Середин В.В. Основные закономерности распределения редкоземельных элементов в углях // Геохимия. 2001. Т. 377, № 2. С. 239–243.

Середин В.В. Металлоносность углей: условия формирования и перспективы освоения // Угольная база России. Т. 6. Основные закономерности углеобразования и размещения угленосности на территории России. М.: Геоинформмарк, 2004. С. 453–519.

Угольная база России. Т. 1. Угольные бассейны и месторождения европейской части России (Северный Кавказ, Восточный Донбасс, Подмосковный, Камский и Печорский бассейны, Урал). М.: Геоинформмарк, 2000. 483 с.

Хасанов Р.Р. Геолого-геохимические факторы оруденения в палеозойских угленосных формациях центральной части Волго-Уральской антеклизы // Изв. вузов. Геология и разведка. 2006. № 2. С. 36–41.

Заключение. На основании изложенного можно заключить следующее. Распределение РЗЭ в визейских углях Волго-Уральского региона отличается большим разнообразием в каждой залежи, что обусловлено прежде всего ландшафтно-географическими и геологическими особенностями территории в период формирования торфяников, а также петрографическим составом отложений, вмещающих угольные пласты.

Накопление РЗЭ в визейских углях происходило в две стадии — на стадии торфяно-болотной седиментации и в постседиментационную стадию (диагенез — начало катагенеза). На стадии седиментогенеза РЗЭ поступали в торфяник в составе терригенного материала и метеорных вод и характеризовались меньшей величиной отношения легких и тяжелых элементов. В постседиментационную стадию РЗЭ в угольные пласты поступали в составе подземных вод. Их осаждение происходило в приконтактных зонах пластов в поровых участках углей, проницаемых для подземных вод. Широкое распространение в окружении угольных залежей карбонатных пород и кварц-полевошпатовый состав терригенного материала обусловили преобладание легких лантаноидов, прежде всего церия.

Хасанов Р.Р., Гафуров Ш.З., Исламов А.Ф. Редкоземельные элементы в визейских угольных пластах Волго-Уральского региона // Уч. зап. Казан. ун-та. Сер. естеств. науки. 2010. Т. 152. Кн. 4. С. 116–122.

Хасанов Р.Р., Исламов А.Ф., Богомолов А.Х. Сравнительная характеристика ультрадисперсной минеральной составляющей ископаемых углей Камского и Донецкого бассейнов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2013. № 4. С. 18–23.

Хасанов Р.Р., Ларочкина И.А. Условия залегания и способы освоения нефтяных и угольных пластов в предвизейских депрессиях Волго-Уральской провинции // Нефтяное хозяйство. 2013. № 1. С. 36–39.

Юдович Я.Э., Кетрис М.П., Мерц А.В. Элементы-примеси в ископаемых углях. Л.: Наука, 1985. 239 с.

Boynnton W.V. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies // Rare Earth Element Geochemistry. Amsterdam: Elsevier Sci. Publ., 1984. P. 63–114.

Finkelman R.B. Modes of occurrence of trace elements in coal: Ph. D. Dissert. College Park: Dept. Chem., University of Mariland, 1980. 302 p.

Mao Guangzhou, Hua Renmin, Gao Jianfeng et al. Existing forms of REE in gold-bearing pyrite of the Jinshan gold deposit, Jiangxi Province, China // J. Rare Earths. 2009. Vol. 27, N 6. P. 10–79.

Seredin V.V., Shifeng Dai. Coal deposits as potential alternative sources for lanthanides and yttrium // Int. J. of Coal Geol. 2012. Vol. 94. P. 67–93.

Wang W., Qin Y., Song D., Fu X. REE Geochemistry of moderate- and high-sulfur coals from North Shanxi, China // Chinese J. Geochemistry. English Ed. 2003. Vol. 22, N 2. P. 123–132.

Поступила в редакцию
04.09.2013