

УДК 553.94:550.4(55)

## УГОЛЬНЫЙ МЕТАМОРФИЗМ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ-ПРИМЕСЕЙ (НА ПРИМЕРЕ УГЛЕЙ ИРАНА)

В.И. Рыбалко

Томский политехнический университет

E-mail: rybalko14@yandex.ru

Рассмотрено влияние регионального и контактового метаморфизма углей на геохимический спектр угольных месторождений Ирана. Установлено, что процессы регионального метаморфизма, рассмотренные на примере среднеюрских угольных месторождений Табасского бассейна, приводят к увеличению содержания большинства элементов-примесей в углях. При исследовании контактового воздействия магматических тел на уголь, на примере месторождения Сангеруд в Эльбурсском угольном бассейне, выявлена зона обеднения углей элементами-примесями, измеряемая первыми сантиметрами. Показано, что процессы метаморфизма не являются ведущим фактором, определяющим уровни накопления редких элементов в углях.

### Ключевые слова:

Уголь, Иран, метаморфизм углей, элементы-примеси.

### Key words:

Coal, Iran, metamorphism of coal, trace elements.

В настоящее время под метаморфизмом углей понимается комплекс постдиагенетических преобразований угольного вещества в термобарических (и геохимических) условиях зон ката- и метагенеза [1]. За исключением преобразований угля на контакте с интрузивными телами понятие «метаморфизм углей» не совпадает с термином «метаморфизм горных пород». Угольному метаморфизму в петрологии соответствует дометаморфические превращения горных пород – катагенез. Вопрос о поведении элементов-примесей в процессе угольного метаморфизма изучен достаточно слабо.

Цель настоящих исследований – рассмотреть влияние угольного регионального и контактового метаморфизма на геохимический спектр угольных месторождений Ирана. Наиболее достоверную информацию о влиянии регионального метаморфизма на распределение элементов-примесей в углях можно получить, сопоставив средние содержания этих элементов в углях разной степени углефикации в Табасском угольном бассейне. Влияние контактового метаморфизма рассмотрено на примере угольного месторождения Сангеруд Эльбурсского бассейна.

### Характеристика объектов исследования

В настоящей работе рассматриваются каменные угли двух угольных бассейнов Ирана: Эльбурсского и Табасского. Общие ресурсы угля в этих бассейнах превышают 36 млрд т. Угли имеют триасюрский возраст, угольные пласты маломощные: средняя мощность рабочих пластов составляет 1...2 м [2]. Для получения наиболее объективной оценки влияния регионального метаморфизма на распределение элементов-примесей были выбраны угольные месторождения одновозрастных среднеюрских углей Табасского бассейна [2] (рис. 1, табл. 1). Среди изученных марок газовые жирные (ГЖ), коксовые жирные (КЖ) и антрациты (А).

На территории Ирана контактово-метаморфические процессы, связанные с внедрением интрузивных тел, отмечаются на месторождении Сангеруд Эльбурсского бассейна. Интрузия представлена дайкой андезибазальтового состава, прорывающей угольный пласт мощностью 0,5...1 м.

живных тел, отмечаются на месторождении Сангеруд Эльбурсского бассейна. Интрузия представлена дайкой андезибазальтового состава, прорывающей угольный пласт мощностью 0,5...1 м.

**Таблица 1.** Распределение угольных месторождений Табасского бассейна по марочному составу

Марка углей	ГЖ	КЖ	А
Угольные месторождения	Хамкар Хашуни Пабдана	Ходжедж	Джафаран Мазино Бадаму



**Рис. 1.** Схема расположения исследуемых месторождений угля в Табасском бассейне

### Методика исследований

Для оценки воздействия угольного метаморфизма на угли было выполнено геохимическое опробование угольных месторождений. Отбор проб производился бороздовым способом вкрест простиранья угольного пласта. На месторождении Сангеруд, в зоне воздействия интрузии на уголь-

ный пласт, были отобраны пробы из тела дайки, из непосредственного контакта угля с дайкой, на расстоянии 5, 10, 80 см и 5 м от контакта (рис. 2).

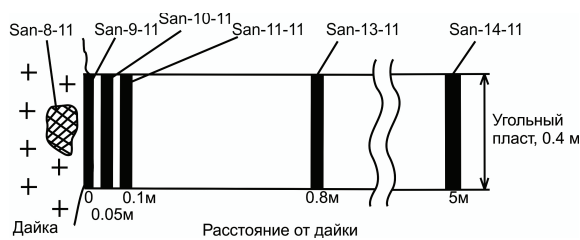


Рис. 2. Схема опробования месторождения Сангеруд на контакте с дайкой

Затем пробы высушивались в естественных условиях, дробились и истирались до пудры (0,074 мм).

Во всех углях и углистых породах определена зольность. Зольность и влажность определялась в Проблемной научно-исследовательской лаборатории по комплексному использованию горючих полезных ископаемых Западной Сибири кафедры химической технологии топлива и химической кибернетики Института природных ресурсов Томского политехнического университета (ТПУ) по ГОСТ 11022-95 (аналитики С.Г. Маслов, В.С. Архипов). Для количественного определения элементов-примесей использовались современные аналитические методы. Основным методом является многоэлементный инструментальный нейтронно-активационный анализ (ИНАА), выполненный в ядерно-геохимической лаборатории кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов ТПУ (аналитик А.Ф. Судыко). Широкий спектр элементов определялся масс-спектрометрическим методом с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS). Анализ выполнялся в центре коллективного пользования «Аналитический центр геохимии природных систем» Томского Государственного университета (аналитик Ю.В. Аношкина). Для оценки содержания в золах углей основных золообразующих элементов и отдельных микроэлементов в лаборатории рентгеноспектральных методов анализа института Геологии и минералогии СО РАН (г. Новосибирск) выполнен рентгено-флуоресцентный анализ (аналитик Н.Г. Карманова).

#### Региональный метаморфизм

При погружении угленосных толщ вследствие повышения температуры и давления в недрах развиваются процессы метаморфизма угольного органического вещества, сопровождаемые глубокими изменениями неорганического вещества. Работ, посвященных вопросу поведения малых элементов в процессе угольного метаморфизма, мало. Влияние регионального метаморфизма на распределение малых элементов охарактеризовано в работах [3, 4]. Полученные выводы о влиянии регионального метаморфизма на угли основаны на сравнении содержаний элементов в углях разной степени метаморфизма. В большинстве случаев отмечается

тенденция снижения содержаний элементов-примесей в ряду бурые угли–антрациты. Однако при погружении угленосных толщ может иметь место и эпигенетическая минерализация, связанная с гидротермальными процессами [5].

Важной особенностью развития территории Ирана со времени угленакопления и по настоящее время является периодически проявляющаяся тектоническая активность, сказавшаяся на мощности угленосных отложений и степени регионального метаморфизма углей. В связи с этим в Иране наиболее часто встречаются угли марок ГЖ, КЖ, К, Т, А, а угли марок Д и Г имеют весьма ограниченное распространение.

Поскольку на территории Табасского угольного бассейна Ирана одновозрастные угли представлены марками ГЖ, КЖ и А, а угли марки КЖ отмечены только в одном месторождении Ходжедж, было принято решение объединить угли марок ГЖ и КЖ в одну группу и сравнивать с углями марки А.

Органическое вещество углей за весь период его геохимической истории и преобразования от торфов до графитов претерпевает непрерывную убыль массы, сопровождающуюся выделением летучих продуктов. По данным [6], потери от первоначального количества захороненного органического вещества в углях марок (КЖ+ГЖ) составляют около 49 %, а в углях марки А – 54 %. При этом общая органическая масса углей в процессе преобразования от марок (КЖ+ГЖ) к антрацитам характеризуется ростом содержаний углерода и снижением содержаний Н, N, S, O. Снижение концентраций Н, N, S, O связано с выделением летучих продуктов в форме CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O. В то же время потеря органического вещества, характеризующаяся возрастанием средней зольности от 18,8 % углей марок (КЖ+ГЖ) до 24,3 % углей марки А, сопровождается и потерей минерального вещества. Это можно проследить на примере ряда золообразующих и малых элементов. Содержание Са в углях в ряду (КЖ+ГЖ)–А уменьшается от 0,66 до 0,45 %. Среди малых элементов по мере увеличения степени углефикации выносятся такие элементы как Sc, Zn, U, Sb (табл. 2). Эти данные согласуются с данными [3] о снижении уровней накопления углефильных элементов в углях Кузбасса от углей марки Д до антрацитов. В исследуемых углях Табасского бассейна Ирана отмечено возрастание содержаний в угле Cr, Co, Rb, Cs, La, Ce, Yb, Au, Th. При этом концентрации таких элементов-гидролизатов, как Nd, Sm, Tb, Lu, Hf, Ta, изменяются незначительно. В общем случае при отсутствии привноса элементов в угольный пласт факт возрастания их содержания может объясняться двумя причинами: потерей органической массы при углефикации и относительным увеличением их концентрации за счет частичного выноса основных золообразующих элементов.

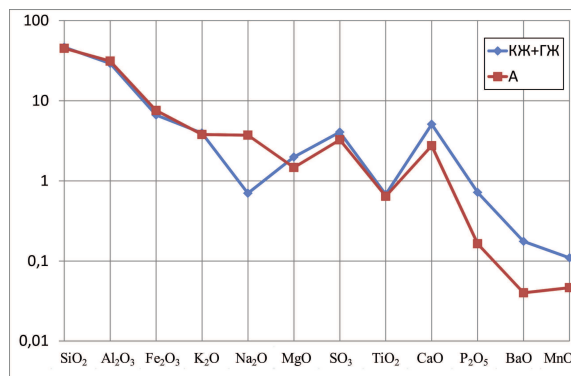
В золе углей с увеличением степени углефикации снижается содержание практически всех элементов-примесей за исключением Cr, Tb, Ta и Co.

**Таблица 2.** Содержание отдельных элементов-примесей в углях и золах углей различного марочного состава, г/т

	Марка угля	A <sup>d</sup> , %*	Sc	Cr	Co	Zn	Rb	Sb	Cs	La	Ce	Nd
Уголь	КЖ+ГЖ	18,8	8,1	29,2	5,9	49,6	42,7	0,9	4,6	10,6	22,0	9,3
	А	24,3	7,8	38,8	8,8	49,1	49,6	0,7	5,7	11,2	22,4	9,3
Зола	КЖ+ГЖ		39,7	149,6	34,1	247,0	224,6	5,2	26,0	56,8	101,4	44,5
	А		38,1	170,5	40,3	209,8	217,9	3,8	21,9	51,9	97,9	38,1
	Марка угля	A <sup>d</sup> , %*	Sm	Eu	Tb	Yb	Lu	Hf	Ta	Au**	U	Th
Уголь	КЖ+ГЖ	18,8	2,4	0,6	0,4	1,1	0,2	1,3	0,2	2,2	1,8	4,9
	А	24,3	2,2	0,5	0,4	1,4	0,2	1,4	0,2	6,8	1,3	5,5
Зола	КЖ+ГЖ		11,6	3,4	2,0	5,4	0,8	7,2	1,3	15,7	9,1	25,8
	А		10,0	2,8	2,0	5,0	0,7	6,4	1,5	7,0	5,7	23,7

Примечание: \* – зольность угля; \*\* – в мг/т.

Для таких породообразующих окислов, как CaO, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, BaO, MgO, MnO, SO<sub>3</sub>, характерно отчетливое снижение концентрации в золе углей с увеличением степени метаморфизма. Для SiO<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>O и TiO<sub>2</sub> характерно незначительное уменьшение, а для Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O – рост содержаний (рис. 3).



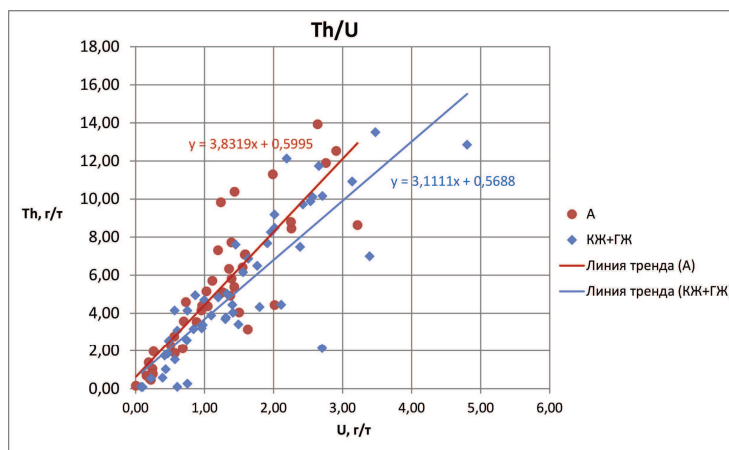
**Рис. 3.** Содержание основных породообразующих окислов в золе углей, вес. %. КЖ+ГЖ – среднее для месторождений угля марок КЖ и ГЖ; А – среднее для антрацитов

Влияние процессов углефикации на химические элементы различной углефильности можно проследить на примере U и Th (рис. 4). Поведение этих элементов в углях Ирана хорошо соотносится

с их общей геохимией. Уран – высокоподвижный элемент в различных процессах и условиях, торий – элемент-гидролизат, характеризующийся слабой подвижностью в низкотемпературных условиях в кислой и нейтральной среде [3]. По характеру наклона линий тренда (рис. 4) можно судить о более высоком торий-урановом отношении в углях марки А по сравнению с углями марок КЖ и ГЖ.

Изменение показателя лантан-иттербиевого отношения в ряду (КЖ+ГЖ)–А позволяет оценить миграционную способность отдельных групп редкоземельных элементов (РЗЭ).

В общем случае редкоземельным элементам свойственно возрастание миграционной способности в углекислых водах с увеличением атомной массы [7, 8]. Согласно оценкам М.П. Кетрис и Я.Э. Юдовича [9], La/Yb в бурых углях составляет в среднем 10, в каменных – 11. Эти данные согласуются с результатами, полученными нами для каменных углей и антрацитов Табасского бассейна Ирана, и позволяют сделать вывод, что миграционно-способные тяжелые РЗЭ были вынесены из углей на стадиях угольного метаморфизма, предшествующих формированию углей изученных марок. По мере возрастания степени углефикации лантан-иттербиевое отношение практически не меняется как в углях, так и в золе углей Ирана (табл. 3).



**Рис. 4.** Торий-урановое отношение в углях. А – пробы из месторождений антрацитов; КЖ+ГЖ – пробы угля из месторождений марок КЖ, ГЖ

**Таблица 3.** Содержание U, Th, La, Yb (г/т), торий-урановое, лантан-иттербиевое отношение в золах углей месторождений Ирана

Месторождение	U	Th	Th/U	La	Yb	La/Yb
Угли марок КЖ+ГЖ						
Хамкар	7,1	27,0	3,8	66,2	6,1	10,8
Хашуни	7,2	31,8	4,4	60,0	5,8	10,4
Пабдана	12,6	27,0	2,1	54,5	5,5	9,9
Ходжедк	9,6	17,4	1,8	46,6	4,0	11,5
<b>Среднее</b>	<b>9,2</b>	<b>25,8</b>	<b>2,8</b>	<b>56,8</b>	<b>5,4</b>	<b>10,5</b>
Угли марок А						
Джафаран	6,6	26,7	4,1	55,7	5,0	11,2
Мазино	4,9	24,7	5,1	54,8	5,8	10,1
Бадаму	5,6	19,8	3,5	45,5	5,5	10,1
<b>Среднее</b>	<b>5,7</b>	<b>23,7</b>	<b>4,2</b>	<b>51,9</b>	<b>5,0</b>	<b>10,4</b>

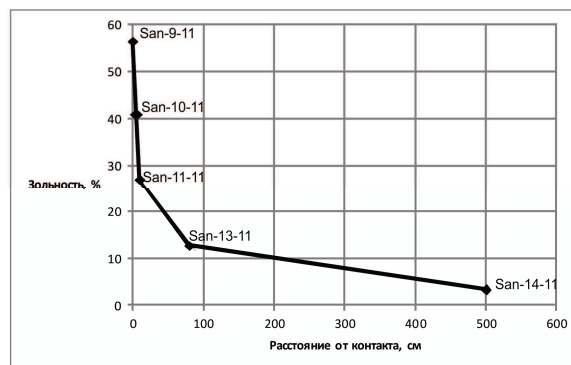
Таким образом, проведенные исследования показали, что процессы регионального метаморфизма в углях Ирана приводят к увеличению содержания большинства элементов-примесей в углях, что, вероятно, связано с потерей органической массы и возрастанием зольности. При сравнении содержаний элементов-примесей в золе угля для многих из них наблюдается снижение концентраций при увеличении степени углефикации. Отмечено относительное увеличение доли некоторых элементов-гидролизатов в угле, обусловленное более интенсивным выносом из угля при метаморфизме такого золообразующего элемента, как Са, и его спутников Ва и Sr, а также ряда микроэлементов (Sc, U, Zn, Sb). Полученные выводы о влиянии регионального метаморфизма на геохимический спектр углей основаны на сравнении углей разного марочного состава и не учитывают других факторов, таких как состав области питания угленосных отложений и фациальные условия накопления углей. Более отчетливую картину поведения элементов-примесей при метаморфизме можно наблюдать при исследовании контактового воздействия интрузивных тел на угольный пласт.

#### Контактовый метаморфизм

По вопросам, посвященным воздействию изверженных пород на неорганическое вещество углей и на поведение элементов-примесей в зонах контакта, имеется незначительное количество работ [3, 10–13]. Приводимые в этих работах данные весьма неоднозначны. Отмечен вынос [10], накопление [11, 13] и перераспределение [3] элементов-примесей в углях при метаморфизме.

Влияние дайки андезибазальтового состава на распределение некоторых элементов-примесей в углях месторождения Сангеруд было рассмотрено в предшествующей работе автора [14].

Характерная особенность углей из зоны контактового метаморфизма – повышенная минерализация на контакте углей с интрузивным телом и её постепенное снижение по мере удаления от контакта (рис. 5). Причиной этого является новообразование минералов в результате взаимодействия гидротермальных растворов и продуктов разложения органического вещества.



**Рис. 5.** График изменения зольности в зоне контакта дайки и углей

В целом распределение большинства элементов-примесей в зоне контакта интрузии и углей достаточно однообразное. Приконтактная область (5...10 см от контакта) обеднена элементами-примесями в разной степени. Содержание Se, Hf, Ва, Nd, Rb, Zn, Та в угле здесь ниже предела обнаружения анализа. Обеднение приконтактной области характерно для Li, В, Sc, Ti, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Rb, Y, Zr, Nb, Mo, Cd, In, Sn, Cs, Ba, РЗЭ, Hf, Та, W, U, Th (рис. 6, а). Золообразующие элементы (Fe, Са), напротив, концентрируются в приконтактной зоне (рис. 6, в). Некоторое обогащение приконтактной области также характерно для Sb, As, Mn (рис. 6, б). Повышенное содержание Mn в приконтактной области ранее отмечалось другими авторами [10]. Это может быть связано с осаждением  $Mn^{2+}$  на геохимическом карбонатном барьере и образованием малорастворимого карбоната либо изоморфной примеси в карбонатах Са, Mg и Fe [15]. Своеобразно поведение Вг, который практически полностью вынесен из зоны контакта, причем как из интрузии, так и из углей (рис. 6, з).

Распределения элементов-примесей в зоне контактового влияния дайки в золе подобно распределению в угле. Только в данном случае для проб, удаленных от контакта на 80 см и 5 м, отмечаются более высокие концентрации практически всех химических элементов по сравнению с их содержанием в интрузивном теле (рис. 7).

Для макрокомпонентного состава зола угля характерно обеднение приконтактной зоны  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $K_2O$ ,  $Na_2O$ ,  $TiO_2$ ,  $P_2O_5$ , ВаО (рис. 8, а) и обогащение  $Fe_2O_3$ , MgO, СаО, MnO (рис. 8, б). Обогащение зола угля приконтактной зоны отдельными окислами связано с новообразованием карбонатных минералов в результате взаимодействия гидротермальных растворов и органического вещества.

Сопоставляя данные по содержанию элементов-примесей в исследуемой дайке андезибазальтов со средними концентрациями элементов-примесей для пород подобного состава верхней части континентальной земной коры [16], можно отметить обогащение дайки всеми элементами-примесями за исключением Mn (табл. 4).

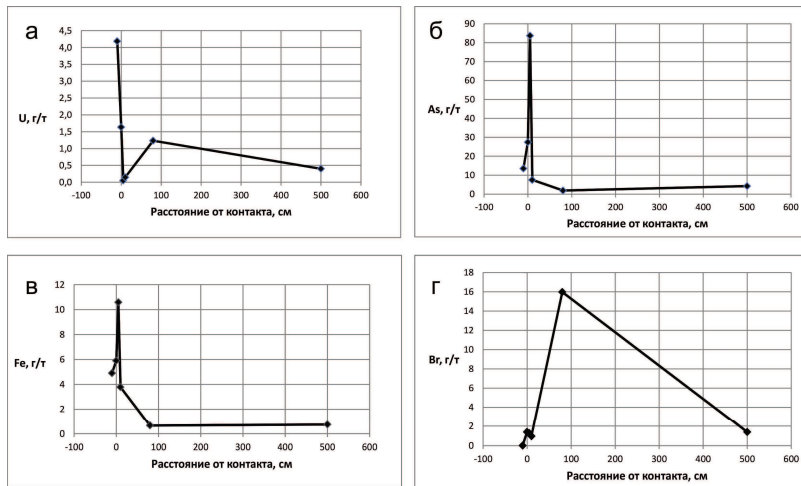


Рис. 6. Распределение: а) U; б) As; в) Fe; г) V в угле вблизи контакта угольного пласта и дайки

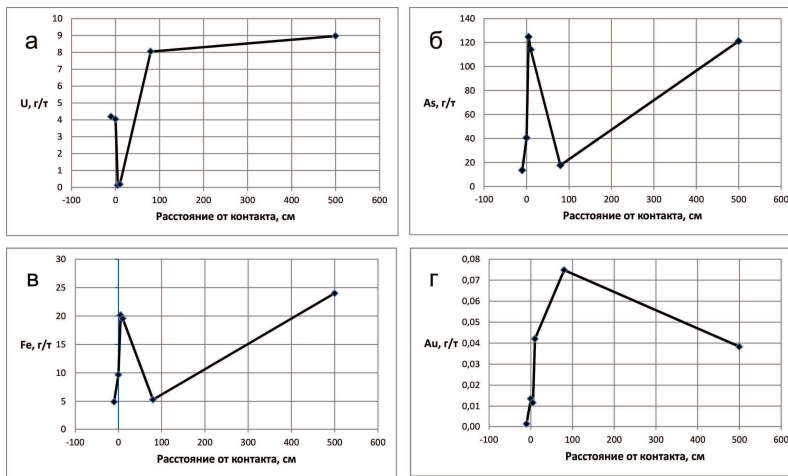


Рис. 7. Распределение: а) U; б) As; в) Fe; г) Au в золе угля вблизи контакта угольного пласта и дайки

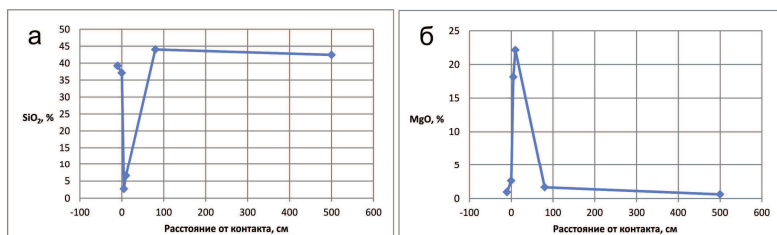


Рис. 8. Распределение золообразующих окислов (а – SiO<sub>2</sub>; б – MgO) в золе угля вблизи контакта угольного пласта и дайки

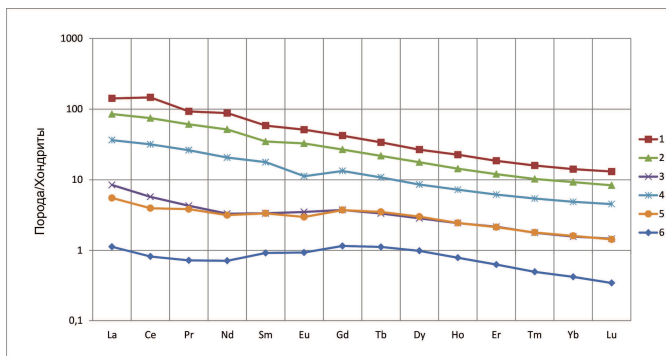


Рис. 9. Спектр распределения РЗЭ в зоне контакта углей и дайки. 1 – проба из интрузивного тела; 2 – зола углей из непосредственного контакта интрузии и угля; 3 – зола угля в 5 см от контакта; 4 – зола угля в 80 см от контакта; 5 – зола угля в 5 м от контакта; 6 – зола неизмененного угля в 80 м от контакта

**Таблица 4.** Сопоставление данных по содержанию элементов-примесей (г/т) в дайке андезибазальтов (1) и средних данных для вулканитов среднего (2) и основного (3) состава верхней части континентальной земной коры [16]

	Sc	Mn	Co	Cr	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Tb	Yb	Lu	Hf	Ta	Th	U
1	39	472	124	481	57	113	56	6,2	4,9	2,6	3,4	0,46	9,8	6,7	8,3	4,2
2	15	1080	19	30	28	50	20	4,3	1,2	0,7	2,0	0,32	3,6	1,0	4,1	1,1
3	31	1400	30	130	19	43	21	5,1	1,6	1,0	2,3	0,46	3,7	0,8	2,7	0,9

Рассматривая профили распределения редкоземельных элементов на контакте угля и дайки, нормированные по отношению к углистым хондритам [17], можно выделить следующие закономерности (рис. 9):

- в зоне контакта исчезает типичное для углей месторождения обогащение РЗЭ средней группы (кривая 6 по сравнению с кривой 2).
- лантан-иттербиевое отношение уменьшается по мере удаления от контакта, что согласуется с геохимией РЗЭ в углекислых водах.
- отсутствие на графиках отрицательной Се-аномалии указывает на бескислородный режим миграции РЗЭ, так как в окислительных условиях происходит окисление церия до  $Se^{4+}$  и выпадение его из раствора и, как следствие, появление отрицательной аномалии в водах и преобразованных ими породах.

Таким образом, при контактовом метаморфизме углей происходит перераспределение элементов за счет встречных флюидопотоков от интрузивных тел и углей и вмещающих пород. При этом угли обогащаются типичными для интрузии элементами, а интрузивное тело обогащается элементами-примесями, характерными для углей. При внедрении в угольный пласт интрузивного тела на непосредственном контакте отмечается зона выноса, которая обеднена большинством элементов-примесей за ис-

ключением некоторых золообразующих элементов (Ca, Fe) и отдельных малых элементов (As, Sb, Mn).

#### Выводы

1. Процессы регионального метаморфизма приводят к увеличению концентраций большинства элементов-примесей в углях, что связано с потерями органической массы при углефикации и возрастании общей зольности. При этом содержание Ca, U, Sb, Zn, Sc в углях в процессе угольного метаморфизма отчетливо снижается. В золах углей при метаморфизме отмечено фракционирование элементов-примесей, обусловленное их разной подвижностью в углекислых растворах и приводящее к относительному накоплению элементов-гидролизатов.
2. При контактовом воздействии интрузивных тел на угли ведущее значение приобретают контактово-метасоматические процессы, в результате которых интрузивное тело обогащается элементами-примесями, типичными для углей (Sc, Co, U, Th, РЗЭ и др.), а угли обогащаются элементами-примесями, характерными для интрузивных тел (Mn). Зона ближайшего контакта в угольном пласте обеднена большинством элементов-примесей, за исключением некоторых золообразующих элементов (Ca, Fe) и отдельных малых элементов (As, Sb, Mn).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Угольная база России. Т. VI. Основные закономерности углеобразования и размещения угленосности на территории России. – М.: ООО «Геоинформмарк», 2004. – 779 с.
2. Геология и полезные ископаемые зарубежных стран. Вып. 1. Минерально-сырьевая база Ирана (твердые полезные ископаемые) / под ред. В.П. Орлова. – М.; СПб.: ВНИИЗарубежгеологии, 1993. – 300 с.
3. Арбузов С.И., Ершов В.В. Геохимия редких элементов в углях Сибири. – Томск: Изд. дом «Д-Принт», 2007. – 468 с.
4. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Ценные элементы-примеси в углях. – Екатеринбург: УрО РАН, 2006. – 538 с.
5. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Неорганическая геохимия угля: аспекты теории. – Сыктывкар: Геопринт, 2003. – 56 с.
6. Радченко О.А., Рогозина Е.А. О соотношениях в изменении функциональных групп и летучих продуктов углефикации гумусовых углей // Химия твердого топлива. – 1975. – № 3. – С. 3–14.
7. Балашов Ю.А. Геохимия редкоземельных элементов. – М.: Наука, 1976. – 267 с.
8. Вах Е.А., Харитоновна Н.А., Вах А.А. Редкоземельные элементы в углекислых минеральных водах приморья // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: Матер. Всеросс. конф. с участием иностранных ученых. – Томск: Изд-во НТЛ, 2012. – С. 307–310.
9. Ketris M.P., Yudovich Ya.E. Estimations of Clarkes for Carbonaceous biolithes: World averages for trace element contents in black shales and coals // Int. J. Coal Geol. – 2009. – V. 78. – P. 135–148.
10. Querol X., Alastuey A., Lopez-Soler A., Plana F. et al. Geological controls on the mineral matter and trace elements of coals from the Fuxin basin, Liaoning Province, northeast China // Int. J. Coal Geology. – 1997. – V. 34. – № 1–2. – P. 89–109.
11. Finkelman R.B., Bostick N.H., Dulong F.T., Senftle F.E., Thorpe A.N. Influence of an igneous intrusion on the inorganic geochemistry of a bituminous coal from Pitkin County, Colorado // Int. J. Coal Geology. – 1998. – V. 36. – № 3–4. – P. 223–241.
12. Goodarzi F., Cameron A.R. Organic petrology and elemental distribution in thermally altered coals from Telkwa, British Columbia // Energy Sources. – 1990. – V. 12. – P. 315–343.
13. Гуревич А.Б., Гаврилова О.И. Об эманационном воздействии интрузивных траппов на ископаемые угли // Литология и полезные ископаемые. – 1990. – № 4. – С. 125–128.
14. Рыбалко В.И. Распределение U, Th и REE в зоне влияния дайки андезибазальтового состава в углях месторождения Сангеруд // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: Матер. Всеросс. конф. с участием иностранных ученых. – Томск: Изд-во НТЛ, 2012. – С. 271–274.
15. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Токсичные элементы-примеси в ископаемых углях. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 656 с.
16. Григорьев Н.А. Среднее содержание химических элементов в горных породах, слагающих верхнюю часть континентальной коры // Геохимия. – 2003. – № 7. – С. 785–792.
17. McDonough W.F., Sun S.S. The composition of the Earth // Chemical Geology. – 1995. – V. 120. – P. 223–253.

Поступила 28.11.2012 г.