

УДК 553.94:550.4

## ГЕОХИМИЯ ПОРОДООБРАЗУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ И РЗЭ В КАА-ХЕМСКОМ УГОЛЬНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ

© 2021 г. Н. Н. Янчат<sup>1,\*</sup>, Л. Х. Тас-оол<sup>1,\*\*</sup>

<sup>1</sup> ФГБУН Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН, 667007 Кызыл, Россия

\*e-mail: janchat62@mail.ru

\*\*e-mail: tasool51@mail.ru

Поступила в редакцию 12.02.2020 г.

После доработки 29.07.2020 г.

Принята к публикации 07.10.2020 г.

Рассмотрено распределение золообразующих элементов и РЗЭ в угольном пласте 2.2-Улуг и в углевмещающих породах Каа-Хемского месторождения. Установлено, что в неокисленных и полуокисленных углях зола железисто-кальциево-кремнистая и гидролизатная,  $GM_{cp} = 1.40$ , в окисленных углях – глиноземисто-кремнистая, сиаллитная,  $GM_{cp} = 0.49$ . Выявлен карбонатный состав внутрипластового породного прослоя угля. Показано, что источником сноса обломочного материала угленосной толщи явились интрузивные ассоциации Каахемского гранитоидного батолита.

Ключевые слова: уголь, Каа-Хемское месторождение, золообразующие элементы, карбонатный партинг

DOI: 10.31857/S0023117721010096

### ВВЕДЕНИЕ

Каа-Хемское месторождение каменных углей расположено в восточной окраине Улуг-Хемского угольного бассейна. Площадь месторождения ~180 км<sup>2</sup>, детально разведана ~45 км<sup>2</sup>. Угленосность месторождения связана с отложениями эрбекской ( $J_{2er}$ ) и салдамской ( $J_{2-3sl}$ ) свит, содержащих до 19 угольных пластов, пропластков и линз угля мощностью от 0.05 до 11.2 м.

Эрбекская свита подразделена на нижнюю и верхнюю подсвиты. Нижнеэрбекская подсвита ( $J_{2er_1}$ ) мощностью 90–160 м залегает на породах элестской свиты ( $J_1el$ ) или на палеозойских отложениях, представлена она преимущественно разномасштабными песчаниками, гравелитами, мелкогалечными конгломератами, алевролитами и завершается основным и выдержанным угольным пластом 2.2-Улуг (М 1.7–11.2 м). Этот пласт перекрывают отложения верхнеэрбекской подсвиты ( $J_{2er_2}$ ) мощностью ~360 м, сложенные разномасштабными песчаниками, алевролитами, редкими прослоями гравелитов. К верхней подсвите приурочено до 18 невыдержанных угольных пластов, пропластков и линз угля (М 0.05–2.65 м), распространенных на очень ограниченных и разрозненных по площади участках. В западной части месторождения распространены отложения салдамской свиты, представленной переслаива-

нием песчаников мелкозернистых, алевролитов и пропластков угля [1].

С северной, северо-восточной и восточной сторон месторождение обрамляет один из крупных магматических образований в Алтае-Саянской складчатой области – Каахемский полихронный гранитоидный батолит венд-раннепалеозойского возраста, его площадь в современном эрозионном срезе более 30 тыс. км<sup>2</sup> [2–4].

В целом на площади бассейна угольный пласт 2.2-Улуг имеет простое строение с одним-двумя породными прослоями алевролитов или аргиллитов (мощностью <0.1–0.4 м), появляющихся в отдельных пластопересечениях в краевых частях [1]. Средний состав золы рядовых углей, мас. %: SiO<sub>2</sub> 27.8; CaO 22.4; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 18.0; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 16.3; MgO 3.1; K<sub>2</sub>O 0.8; Na<sub>2</sub>O 1.6; TiO<sub>2</sub> 0.7; SO<sub>3</sub> 8.2 [1]. В соответствии с отчетами геологоразведочных работ (Н.А. Пичугин, 1964 г., Р.Т. Уссар, 1985 г.) каахемские угли подразделяются на *неокисленные*, *полуокисленные*, *окисленные* (табл. 1). Изменение органического вещества каахемского угля при гипергенном окислении проявляется в уменьшении доли углерода  $C^{daf}$ , водорода  $H^{daf}$ , серы  $S_i^d$  и азота  $N^{daf}$  за счет роста количества кислорода  $O^{daf}$ . У окисленного угля, в сравнении с неокисленным, теплота сгорания снижена на 28% при существенном росте влажности (в ~10 раз) и зольности (в ~7 раз). Выход летучих веществ окисленного

**Таблица 1.** Основные показатели технического анализа и химического состава каахемских углей разной окисленности

Показатель, %	Уголь*		
	неокисленный	полуокисленный	окисленный
$W^a$	0.9	2.2	8.6
$A^d$	6.1	10.6	40.7
$S_t^d$	0.3	0.2	0.2
$V^{daf}$	46.3	48.4	44.3
$Q_s^{daf}$ , МДж/кг	35.2	33.6	25.6
$C^{daf}$	83.7	81.4	65.7
$H^{daf}$	6.2	5.9	5.5
$N^{daf}$	1.5	1.3	1.0
$O^{daf}$	8.5	11.4	27.6

\* Данные из фонда геологической информации по РТ: Н.А. Пичугин, 1964 г., Р.Т. Уссар, 1985 г.

угля (44%) ниже, чем у полуокисленного (48%) и неокисленного (46%).

Окисленные угли, используемые в республике в качестве топлива, распространены в восточной части месторождения в полосе шириной 125–250 м вдоль линии выхода пласта 2.2-Улуг на дневную поверхность (~10 км). Полуокисленные угли, являющиеся хорошим энергетическим топливом, распространены вдоль северо-восточной границы месторождения на поле шириной 600–1400 м. Западная граница участка полуокисленных углей, проведенная по линии предельного коэффициента вскрыши 1:10, является восточной границей зоны коксующихся неокисленных углей. Открытые работы ведутся в зонах залегающих окисленных и полуокисленных углей.

В настоящей работе представлены первые результаты собственных исследований о распределении породообразующих элементов в золе угля пласта 2.2-Улуг, партинге и вмещающих породах Каа-Хемского месторождения. Проведена обработка данных из материалов Территориального фонда геологической информации по Республике Тыва, на основе чего построен табличный свод петрохимических модулей золы угля разной окисленности. Проанализировано распределение естественных ассоциаций РЗЭ в породах обрамления, углях и вмещающих их породах.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Опробованы два обнажения на удалении 6 км друг от друга на разрабатываемых участках “Север” и “Юг” разреза “Каа-Хемский”. На каждом обнажении отобраны пробы угля, партинга, пород подошвы и кровли по схеме (рис. 1). Проведен анализ содержаний золообразующих элемен-

тов в отобранных образцах угля ( $n = 4$ ), партинга ( $n = 2$ ) и углевмещающих породах ( $n = 4$ ) с привлечением данных по образцам полуокисленных ( $n = 52$ ), окисленных ( $n = 11$ ) и неокисленных ( $n = 3$ ) углей, полученных исследователями в период геологоразведочных работ (Н.А. Пичугин, 1964 г., Р.Т. Уссар, 1985 г.).

Зольность угля определена в соответствии с ГОСТом 11022-95 (ИСО 1171-97) при  $(815 \pm 10)^\circ\text{C}$ . Содержания золообразующих элементов, Sg и Ва определены на рентгенофлуоресцентном анализаторе *CPM-25*. Общая сера определена методом полуколичественного анализа на спектрометре *Bruker S4 Pioneer*, пробы угля и пород с большим содержанием сульфатной серы ( $\text{SO}_3 > 1\%$ ), не поддающиеся гомогенизации при сплавлении образцов с тетраборатом лития, проанализированы методом гравиметрии. Содержание РЗЭ определено на масс-спектрометре *ISP-MS* в ИГХ СО РАН имени А.П. Виноградова.

Для изучения углевмещающих пород и партинга были изготовлены шлифы, петрографическое описание шлифов выполнено инженером-геологом Е.К. Дружковой на поляризационном микроскопе ПОЛАМ Л-213М. Обломки пород описаны в соответствии с гранулометрической классификацией Л.Б. Рухина [5], мм: песчаные частицы гравийные ( $>2-10$ ), грубозернистые (1–2), крупнозернистые (0.5–1.0), среднезернистые (0.25–0.5), мелкозернистые (0.1–0.25), тонкозернистые (0.05–0.1); кристаллы кальцита крупнозернистые ( $>0.5$ ), среднезернистые (0.1–0.5), мелкозернистые (0.05–0.1).

Хемотипы золы угля и вмещающих пород изучены по значениям петрохимических модулей: гидролизатного ГМ =  $(\text{TiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 +$

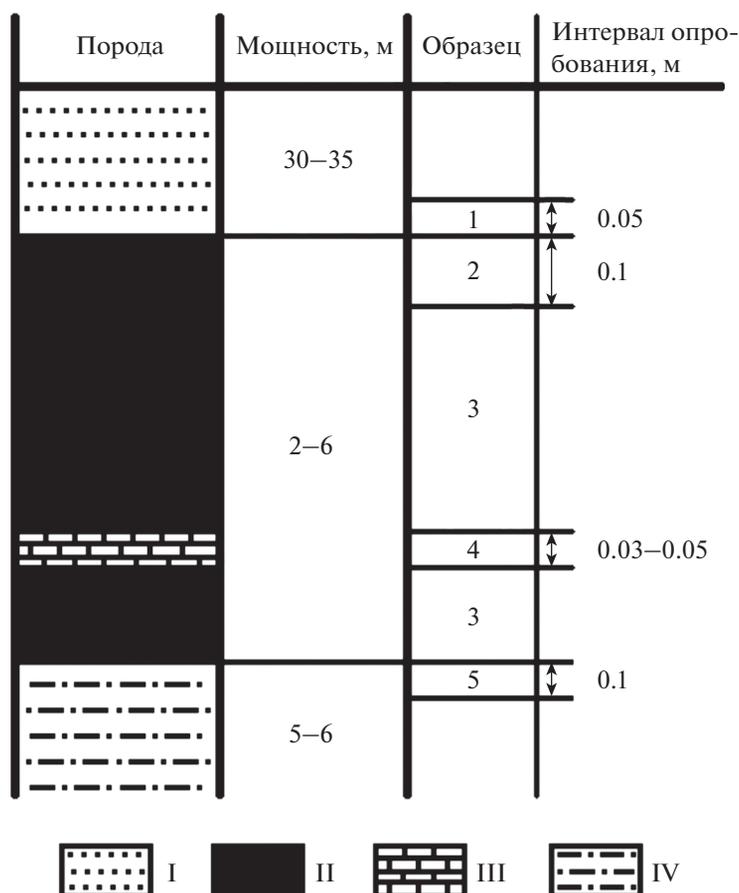


Рис. 1. Схема опробования горных пород на Каа-Хемском месторождении: I – песчаник; II – уголь; III – кальцит углистый; IV – алевролит.

+ FeO + MnO)/SiO<sub>2</sub>; алюмокремниевого АМ = Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>; фемического ФМ = (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + FeO + MnO + MgO)/SiO<sub>2</sub>; железного ЖМ = (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + FeO + MnO)/(TiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>); титанового ТМ = TiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; щелочного ЩМ = Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O; нормированной щелочности НКМ = (Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O)/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [6].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 2 представлены содержания макроэлементов в отобранных пробах пласта 2.2-Улуг, партинга, углевмещающих пород. Там же приведены результаты анализа проб окисленных, полукисленных и неокисленных углей, изученных в период геологоразведочных работ. Мощность угольного пласта, партинга и кровли (вскрыши) на участке “Север” обследованного нами обнажения составляет 2 м, 0.03 м, 30–35 м, на участке “Юг” – 6 м, 0.05 м, 45–50 м соответственно (рис. 1). Контакты угольного пласта с подошвой, внутрипластовым породным прослоем и кровлей резкие, четкие, ровные.

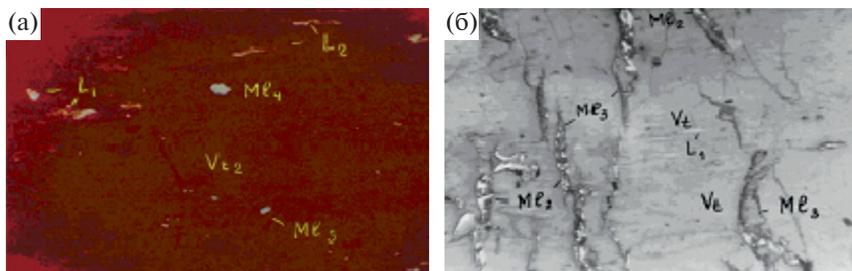
**Угольный пласт 2.2-Улуг.** Пласт сложен в основном блестящими и полублестящими ингредиентами. Макроструктура преимущественно однородная, местами неравномерно штриховатая, неясно полосчатая. Текстура *массивная* с включениями прерывистых слоистых и зернистых микроструктур, что свидетельствует о доминировании однородных условий углеобразования. Поверхности зеркал скольжения имеют штриховатость, развиты трещины кливажа. Качественная реакция с 10%-ной HCl (бурное кипение, шипение) показывает наличие карбонатов, что согласуется с данными [1] о заполнении трещин кливажа углей бассейна (особенно в нижней части пласта) карбонатами, иногда совместно с пиритом.

Согласно данным И.Ю. Яковлева (фонд геологической информации по Республике Тыва, 1987 г.), в шлифах тяжелых фракций каахемских углей ( $d > 1.6 \text{ г/см}^3$ ) среднее содержание минеральных примесей составляет ~13%, их большая часть ~9% приходится на карбонаты (доломит, анкерит и кальцит), содержание пирита менее 3%, кварца менее 2%, глинистых минералов ме-

Таблица 2. Химический состав золы угля пласта 2.2-Улуг и вмещающих пород Каа-Хемского угольного месторождения, мас. %

Компонент	Зола пласта 2.2-Улуг (n = 2)		Зола прикров-левой зоны (n = 2)		Партинг*/ (n = 2)		Подошва*/ (n = 2)		Кровля пласта 2.2-Улуг (n = 2)		Зола угля пласта 2.2-Улуг, средняя по скважинам, (общее число скважин m = 21, материалы территориального фонда геологической информации: Н.А. Пичугин, 1964 г., Р.Т. Уссар, 1985 г.)	неокисленные угли (n = 3, m = 3)	Каахемский гранитоид [3, 4]	
	север	юг	север	юг	север	юг	север	юг	север	юг				s
SiO <sub>2</sub>	22.4	24.5	52.5	57.0	15.4	0.3	57.5	51.7	71.6	73.4	10.5	$\frac{47.0-69.8}{55.9}$	67.6	3.9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.8	9.5	18.0	16.4	1.8	0.3	10.4	10.1	11.9	13.1	3.7	$\frac{18.5-23.4}{21.0}$	15.6	0.8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25.5	31.2	15.2	9.8	4.7	3.1	1.1	1.0	4.9	2.1	6.8	$\frac{4.1-6.0}{4.9}$	3.8	1.5
CaO	20.6	15.5	4.6	5.2	24.5	36.2	0.05	0.2	1.7	0.9	6.9	$\frac{2.0-12.3}{7.3}$	3.5	1.2
MgO	6.4	6.1	3.7	3.5	2.5	2.7	0.4	0.4	0.7	0.4	1.4	$\frac{3.3-8.2}{5.3}$	1.3	0.9
TiO <sub>2</sub>	0.5	0.5	0.7	0.7	0.3	0.01	1.1	1.0	0.4	0.4	0.1	$\frac{0.2-0.7}{0.5}$	0.4	0.2
MnO	0.1	0.5	0.1	0.1	0.1	0.2	0.01	0.01	0.1	0.03	0.5	0.7	0.2	0.03
Na <sub>2</sub> O	1.1	0.7	0.8	1.8	0.1	0.1	0.05	0.05	1.8	3.0	0.5	$\frac{0.3-3.2}{1.1}$	3.9	0.9
K <sub>2</sub> O	0.6	0.6	1.8	1.8	0.3	0.01	1.8	1.7	2.4	1.8	0.3	$\frac{0.3-2.4}{1.8}$	2.4	1.1
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.03	0.07	0.04	0.10	0.02	0.01	0.02	0.02	0.09	0.07	—	—	0.10	0.05
S <sub>общ</sub>	3.06	3.27	1.07	1.06	0.31	0.33	<0.02	0.05	<0.02	<0.02	—	—	—	—
S <sub>нпр</sub>	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	0.03	<0.02	—	0.02	0	0	—	—	—	—
SO <sub>3</sub>	7.9	8.5	2.9	3.2	0.71	0.86	—	0.08	0	0	1.8	$\frac{0.7-1.2}{1.0}$	—	—
n.n.n.	2.1	1.5	0.8	0.5	49.8	56.7	27.1	33.6	4.4	4.8	1.5	$\frac{0.0-0.9}{0.4}$	1.0	0.5
A <sup>d</sup>	4.4	7.9	9.4	21.0	50.8	52.0	73.2	71.2	100	100	2.5	$\frac{25.6-51.5}{40.7}$	—	—

\* Содержание разных форм серы определено методом приближенно-количественного анализа с предварительным озолением пробы при 815°C, t = 2 ч; прочерк — отсутствие данных.



**Рис. 2.** Фотографии шлифов угля пласта 2.2-Улуг с Каа-Хемского месторождения (материалы территориального фонда геологической информации по Республике Тыва. И.Ю. Яковлева, 1987 г.) в проходящем свете (а), в отраженном свете (б); увеличение: а, б – 80х. Условные обозначения: Vt – мацералы группы витринита; Vt<sub>2</sub> – телинит; L<sub>1</sub> – споринит; L<sub>2</sub> – кутинит; Ml<sub>2</sub> – сульфиды железа; Ml<sub>3</sub> – карбонаты; Ml<sub>4</sub> – оксид кремния.

нее 1% (см. рис. 2, а, б). По данным химической лаборатории разреза “Каа-Хемский” от 2007 г. в каахемских углях две третьих от общего количества серы представлена органической формой,  $S_{\text{орг}} : S_{\text{сульфат}} : S_{\text{пир}} = 65 : 23 : 12$ . Повышенная сернистость угля (0.6–1.3%) отмечается в зонах расщепления пласта в краевых частях бассейна [1].

В порошке золы каахемского угля методом качественного рентгенофазового анализа ранее нами идентифицированы [7] кварц, гематит, периклаз, анатаз, сидерит, кальцит, ангидрит, гипс, пирит, полевые шпаты, серицит, бавалит, монтмориллонит, муллит, ангидрит, монтчеллит. Очевидно, неопределенная часть из некоторых перечисленных минералов, например, ангидрита, сидерита, кальцита и др., образуется в процессе озоления угля.

Анализ данных табл. 2 показывает, что на ранних стадиях выветривания угля состав золы изменяется слабо. В неокисленном и полуокисленном угле зола железисто(16; 19%)-кальциево(16; 22%)-кремнистая(37; 30%), в окисленном угле глиноземисто(21%)-кремнистая(56%). В золе окисленного угля, в сравнении с полуокисленным, зольность повышена четырехкратно с ростом содержания Al и Si в 1.6 и 1.9 раза соответственно, а содержания Ca и Fe снижены в 3 и 4 раза. Вероятно, в зоне гипергенеза угольного пласта Al, Si накапливаются в составе устойчивых минералов (кварц, полевые шпаты, алюмосиликаты), а Ca и Fe выносятся в составе вторичных подвижных гуминовых кислот и фульвокислот.

По значениям петрохимических модулей (табл. 3) зола неокисленного и полуокисленного угля ( $GM_{\text{ср}} = 1.40$ ) в терминах литохимии [6] аттестуется как гидролизат ( $GM$  более 0.55), окисленного угля ( $GM_{\text{ср}} = 0.49$ ) – как сиаллит ( $GM$  от 0.55 до 0.30). Сиаллитный тип золы суперглиноземистый  $AM_{\text{ср}} = 0.38$  (результат накопления Al), гипожелезистый  $JM_{\text{ср}} = 0.13$  (результат выноса Fe). На угленосной площади значение  $GM$  золы угля увеличивается в направлении с востока на запад,

т.е. по мере возрастания мощности пласта (от 1.0 до 11.2 м) и его глубины залегания (от 20.8 до 366.6 м).

В исследованных обнажениях угольный пласт полуокисленный, зольность угля в прикровельной части пласта в 2.5 раза выше, чем в центральной (15.2% против 6.1%). В центральной части пласта зола угля железисто(19%)-кальциево(22%)-кремнистая(30%). Состав золы прикровельного угля близок к составу золы окисленного угля ( $Al_2O_3$  21%,  $SiO_2$  56%). Повышенная титанистость угля прикровельной зоны (0.07% против 0.05%) скорее всего связана со способностью Ti накапливаться в окисленных углях за счет привноса из кровли пласта [8].

На северном участке каахемского разреза тип золы прикровельного полуокисленного угля гипогидролизатный  $GM = 0.65$ , на южном участке сиаллитный  $GM = 0.47$ . В центральной части пласта зола угля на обоих участках гидролизатная  $GM_{\text{ср}} = 1.70$  и здесь гидролизатного материала значительно больше, чем в прикровле. Различные значения  $GM$  прикровельного угля на северном и южном участках отражают неодинаковость их выветривания. Активность окисления угля контактной зоны пласта, приуроченной к песчанику среднезернистому (южный участок) сильнее, чем в случае выхода пласта к песчанику крупнозернистому (северный участок, см. ниже).

**Внутрипластовый породный прослой (партинг).** Породный прослой ограничивает нижнюю ~1/4 часть угольного пласта. Зольность партинга при 810°C 52%; средние потери при прокаливании (п.п.) до 1000°C составили 54%.

Партинг мощностью 3–5 см сложен карбонатным материалом с примесью углистого вещества 10–40%. Карбонат представлен кальцитом средним и крупнокристаллическим. Кальцит трещиноват и деформирован, цвет изменяется от бесцветного до желто-бурого. Углистое вещество в партинге северного участка образует прослой (~6 мм) в форме ветвящихся прерывисто-линзо-

**Таблица 3.** Геохимическая характеристика золы угля пласта 2.2-Улуг Каа-Хемского месторождения и углевмещающих пород

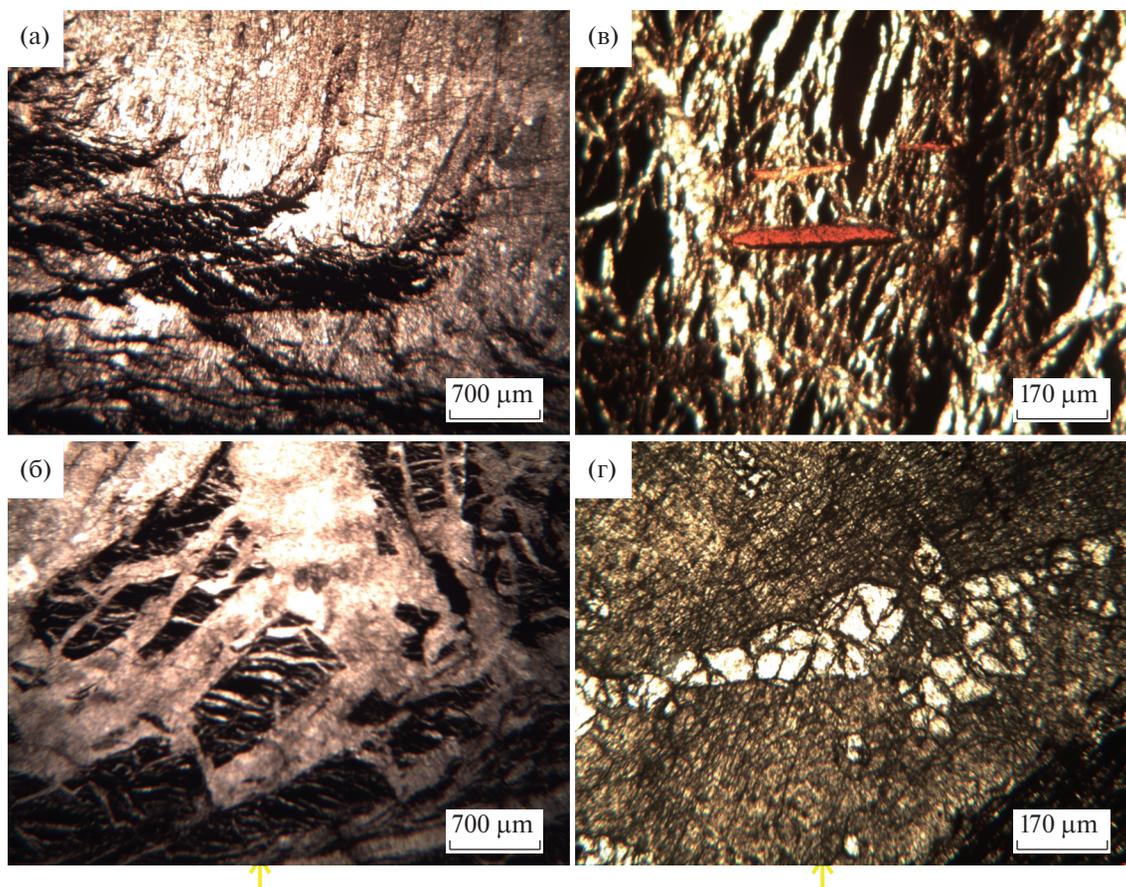
Порода	Тип золы	№ Скв. (число проб)	Геохимический модуль						Мощность пласта, м	Глубина погружения пласта, м	
			ГМ	АМ	ФМ	ЖМ	ТМ	НКМ			
Окисленный уголь	Сиаллиты	667(3)	0.33	0.27	0.06	0.22	0.019	0.19	9.60	22.80	
		682(2)	0.51	0.39	0.11	0.24	0.044	0.10	4.00	8.60	
		661(2)	0.52	0.41	0.28	0.24	0.038	0.15	2.00	9.00	
		660(1)	0.53	0.43	0.17	0.22	0.026	0.13	1.65	17.85	
		666(3)	0.54	0.43	0.29	0.22	0.031	0.15	6.60	22.00	
		Среднее	<b>0.49</b>	<b>0.38</b>	<b>0.18</b>	<b>0.23</b>	<b>0.032</b>	<b>0.14</b>	<b>4.77</b>	<b>16.05</b>	
Полуокисленный уголь	Гидролизаты	гипо-	664(4)	0.73	0.39	0.42	0.81	0.025	0.17	7.20	20.80
			687(2)	0.76	0.36	0.50	1.06	0.039	0.16	6.50	45.30
			659(5)	0.78	0.39	0.45	0.93	0.044	0.14	7.50	26.60
			657(4)	0.78	0.38	0.53	0.96	0.042	0.14	8.70	52.00
			651(1)	0.85	0.51	0.47	0.62	0.027	0.09	1.00	43.00
			среднее	<i>0.78</i>	<i>0.41</i>	<i>0.47</i>	<i>0.88</i>	<i>0.035</i>	<i>0.14</i>	<i>6.18</i>	<i>37.54</i>
		нормо-	663(6)	0.89	0.34	0.67	1.54	0.034	0.16	10.10	58.95
			693(5)	0.97	0.33	0.86	1.82	0.048	0.23	9.10	41.90
			673(5)	0.98	0.32	0.87	1.98	0.042	0.19	6.90	39.00
			675(4)	1.05	0.58	0.61	0.75	0.026	0.15	5.80	41.80
			692(4)	1.13	0.56	0.66	0.95	0.025	0.13	8.70	49.40
			Юг(1)	1.68	0.39	1.52	3.14	0.051	0.14	6.00	56.00
	супер-	Север(1)	1.69	0.53	1.43	2.08	0.041	0.15	2.00	37.00	
		среднее	<i>1.20</i>	<i>0.43</i>	<i>0.95</i>	<i>1.75</i>	<i>0.038</i>	<i>0.16</i>	<i>6.94</i>	<i>46.29</i>	
		671(4)	2.42	0.65	2.15	2.60	0.042	0.23	7.65	37.65	
		690(5)	2.55	0.58	2.45	3.25	0.034	0.13	7.60	22.90	
		685(3)	5.37	0.88	5.26	4.97	0.026	0.12	11.20	32.65	
		среднее	<i>3.45</i>	<i>0.70</i>	<i>3.29</i>	<i>3.61</i>	<i>0.034</i>	<i>0.16</i>	<i>8.82</i>	<i>31.07</i>	
	Среднее			<b>1.51</b>	<b>0.48</b>	<b>1.26</b>	<b>1.83</b>	<b>0.036</b>	<b>0.16</b>	<b>7.06</b>	<b>40.33</b>
	Неокисленный уголь		гипо- 44(1)	0.82	0.34	0.54	1.23	0.068	0.15	4.80	152.35
			гипо- 54(1)	0.83	0.47	0.45	0.69	0.036	0.09	2.10	366.60
			нормо- 43(1)	0.96	0.41	0.67	1.26	0.038	0.15	1.70	158.65
			среднее	<i>0.87</i>	<i>0.41</i>	<i>0.55</i>	<i>1.06</i>	<i>0.047</i>	<i>0.13</i>	<i>2.87</i>	<i>225.87</i>
	Среднее			<b>1.40</b>	<b>0.47</b>	<b>1.14</b>	<b>1.70</b>	<b>0.038</b>	<b>0.15</b>	<b>6.36</b>	<b>71.25</b>
Кровля		Север(1)	0.24	0.17	0.08	0.41	0.030	0.35	0.05*	35	
		Юг(1)	0.21	0.18	0.03	0.15	0.028	0.37	0.05*	50	
Подшва		Север(1)	0.22	0.18	0.03	0.10	0.105	0.17	0.1*	42	
		Юг(1)	0.23	0.19	0.03	0.09	0.100	0.17	0.1*	61	
Каахемский гранитоидный батолит (27)			<b>0.30</b>	<b>0.23</b>	<b>0.08</b>	<b>0.24</b>	<b>0.027</b>	<b>0.40</b>	—	—	

\* Мощность (высота) пробы.

видных образований (рис. 3, а), южного участка растащено и сцементировано кальцитом (рис. 3, б). Переотложенный в трещинах витринит просвечивает (без анализатора) красным цветом (рис. 3, в).

Известно, что формирование пласта Улуг происходило во влажном гумидном климате. На восточной окраине палеоторфяника, которая при-

близительно совпадала с современной окраиной угольного бассейна (район Каа-Хемского месторождения), преобладали аллювиально-озерно-болотные и аллювиально-прибрежно-бассейновые обстановки осадконакопления [9]. Можно предположить, что на граничной площади торфо-, осадконакопления в течение какого-то времени



**Рис. 3.** Фотографии шлифов карбонатного партинга угольного пласта 2.2-Улуг в проходящем свете: а – прерывисто-линзовидное углистое вещество в кальците; б – катаклазированное углистое вещество в кальците; в – перепреотложенный витринит в кальците; г – ларнит в кальците.

(период формирования партинга) ослабился режим обводнения/проточности и появились условия (температура, соотношение компонентов, водородный показатель и др.), подходящие для осаждения и кристаллизации карбонатов, в соответствии с уравнением (1). На стадии последующего объединения этой площади с основным бассейном пласт сформированного карбонатного партинга перекрылся органическим материалом.



Согласно [8, 10] отношение Sr/Ba рассматривается как индикатор палеосолености бассейна, высокое значение показателя ( $\text{Sr}/\text{Ba} > 1$ ) отражает высокую соленость, а низкое указывает на низкую соленость. В угле  $\text{Sr}/\text{Ba} = 1.5$ , углевмещающих породах  $\text{Sr}/\text{Ba} < 1$  (табл. 4). В образцах карбонатного партинга определено значительное накопление и Sr, и Ba, отношение  $\text{Sr}/\text{Ba} > 3.0$ , что свидетельствует об осаждении карбонатов в условиях повышенной солености и/или пониженной обводненности. На основе этих данных можно сделать предположение, что кальцит партинга хемогенный.

Интересной особенностью карбонатного партинга является присутствие минерала ларнита  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  – высокотемпературного контактово-метаморфического силиката кальция. Зерна лар-

**Таблица 4.** Содержания Sr и Ba в угле пласта Улуг и вмещающих породах

Порода и зола	Sr, г/т	Ba, г/т	Sr/Ba
Песчаник подошвы-север	71	306	0.2
Песчаник подошвы-юг	86	286	0.3
Песчаник подошвы-среднее	78	296	0.3
Карбонатный партинг-север	1297	376	3.5
Карбонатный партинг-юг	1677	260	6.5
Карбонатный партинг-среднее	1487	318	4.7
Уголь пласта 2.2-Улуг-север	153	107	1.4
Уголь пласта 2.2-Улуг-юг	169	109	1.6
Уголь пласта 2.2Улуг-среднее	161	108	1.5
Песчаник кровли-север	186	488	0.4
Песчаник кровли-юг	236	476	0.5
Песчаник кровли-среднее	211	782	0.4

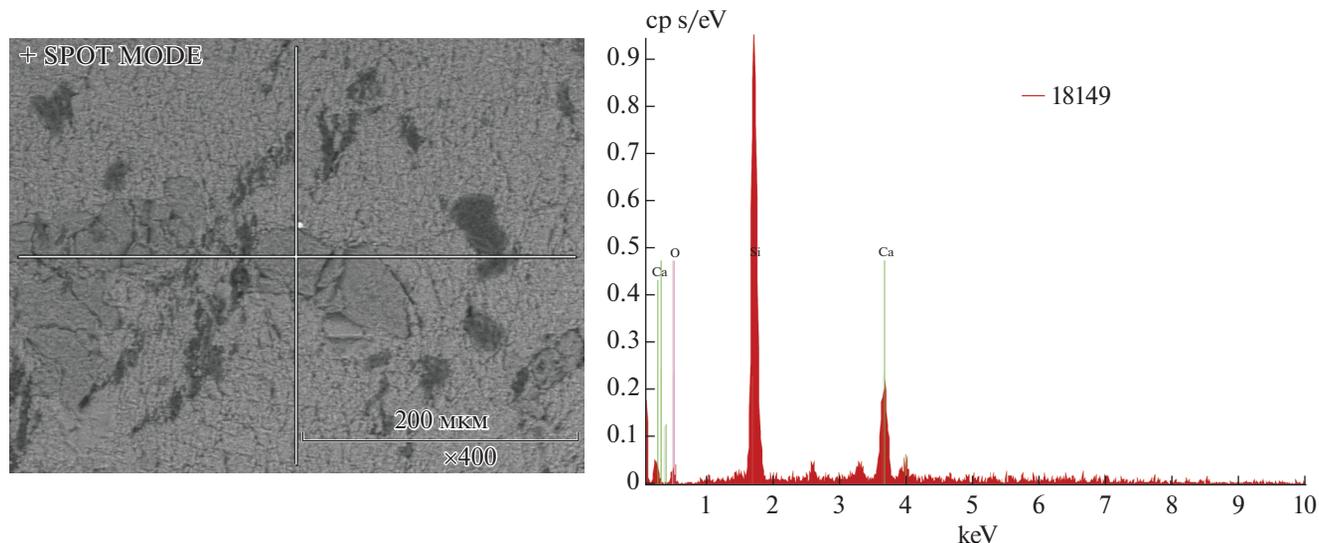


Рис. 4. Микрофотография ларнита в карбонатном партинге угольного пласта 2.2-Улуг и его элементный состав (сделано на сканирующем электронном микроскопе “ТМ-1000” HITACHI-Япония с ЭДС Bruker).

нита белого цвета с характерным высоким рельефом определены в шлифе партинга в проходящем свете (рис. 3, г), состав минерала подтверждается данными электронной микроскопии (рис. 4). В горелых отвалах Копейского бурогоугольного месторождения на Урале минерал ларнит был описан как новообразованный [11, 12]. Установление генезиса ларнита в тувинских углях является вопросом отдельного исследования.

**Углевмещающие породы.** Подстилающие и перекрывающие угольный пласт породы на Каа-Хемском месторождении представлены песчаниками крепкими, массивными граувакко-аркозовыми. В подошве пласта песчаник углистый. По классификационному параметру алюмосиликатных пород тип песчаника – *силиты* (ГМ менее 0.30 [6]), класс – *миосилиты* ГМ 0.21–0.24.

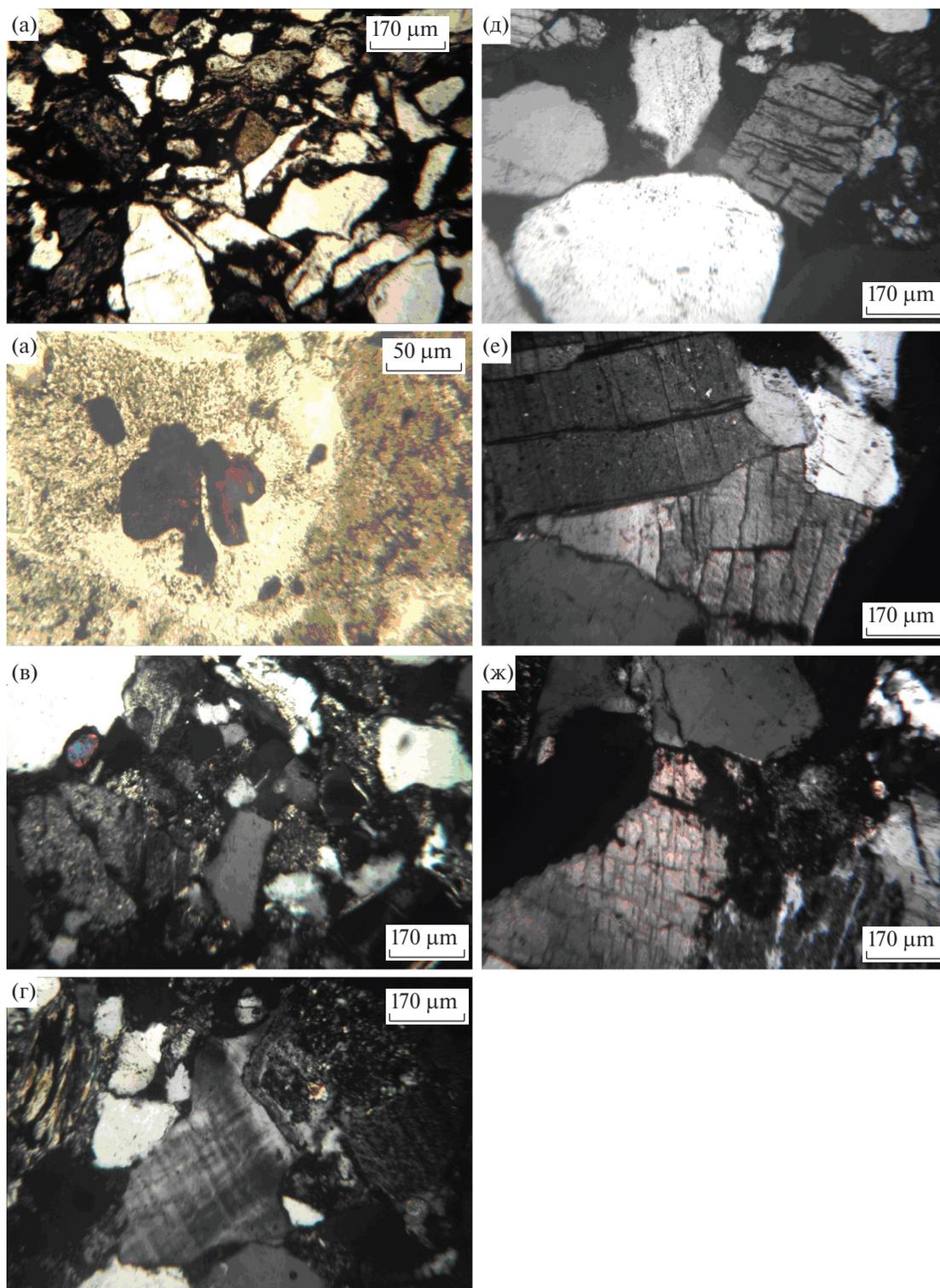
**Подошва пласта.** На южном участке песчаник буровато-черный тонкозернистый, на северном участке темно-серый средне- и крупнозернистый. Обломки угловатые, иногда окатанные, плохо сортированные (рис. 5, а). Обломочная часть составляет ~70%, цемент ~30%. Кварц и полевые шпаты содержатся в равных количествах по ~25%. Обломки пород представлены кислыми эффузивами, микрогранитами, кварцитами, кремнисто-гидрослюдистыми сланцами (рис. 5, б). Отмечается примесь небольшого количества листочков мусковита и биотита, из аксессуарных минералов встречается апатит, рутил, циркон (рис. 5, в). Цемент на южном участке базальный, базально-поровый, по составу глинисто-карбонатный, насыщенный темно-бурым гумусовым веществом, на северном участке контактовый и поровый, глинисто-карбонатный. Карбонат –

мелкокристаллический кальцит, глинистый минерал – тонкочешуйчатый каолинит (рис. 5, г).

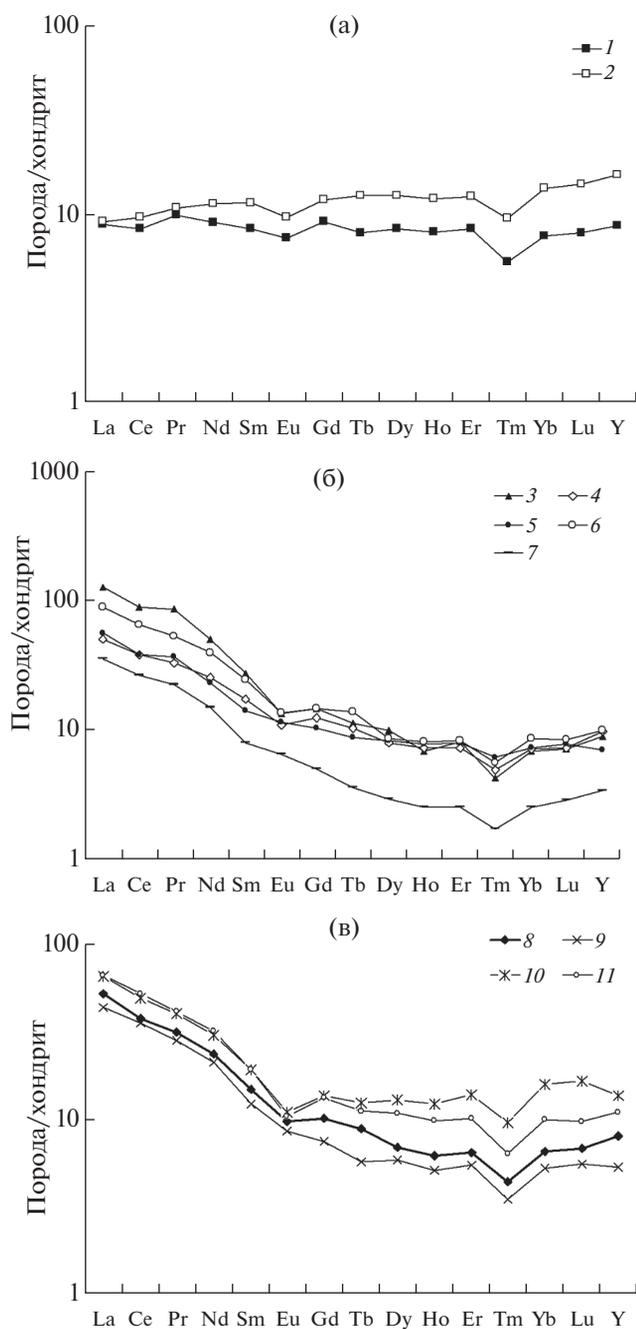
**Кровля пласта.** На южном участке песчаник светло-серый среднезернистый с угловатыми, реже полуокатанными формами зерен, непрочный (рис. 5, д), зерна относительно отсортированы. Содержание обломочной части ~90%, цемента ~10%. Кварца и полевых шпатов по ~25%. Обломки пород представлены риолитами (<15%), гранитами (<15%), кремнями (~10%). Отмечаются листочки биотита и мусковита (~1%), из аксессуарных встречается циркон. Цемент контактово-поровый, преимущественно гидрослюдистый, редко регенерационный кварц-полевошпатовый (рис. 5, д).

На северном участке песчаник буровато-серый разнозернистый, с примесью *гравийного* материала (до 10%). Обломочные зерна угловатые, плохо отсортированные. Содержание обломочной части ~85%, цемента до 15%. Кварца и полевых шпатов по ~35%. Обломки пород представлены микрогранитами, кварцитами, кислыми эффузивами. Присутствуют листочки биотита. Цемент поровый, по составу карбонатный (рис. 5, е) с пленкой-каймой из гидроокислов железа (рис. 5, ж).

**Источник сноса минерального вещества.** Для выявления источника сноса осадочного материала проведен сравнительный анализ нормированных по хондриту [13] содержаний РЗЭ в угле и углевмещающих породах, а также в комплексах пород Каахемского полихронного гранитоидного батолита, расположенного в обрамлении месторождения (рис. 6). РЗЭ выбраны потому, что они относятся к числу наименее подвижных элементов, на которые слабо влияют процессы гидротер-



**Рис. 5.** Фотографии шлифов вмещающих пород (кровля и подошва) угольного пласта 2.2-Улуг в проходящем свете: а – обломочный материал в песчанике подошвы на участке “Юг”; б – обломочный материал в песчанике подошвы на участке “Север”; в – аксессуарный циркон в песчанике подошвы на участке “Север”; г – цемент соприкосновения поровый, глинисто-карбонатный в песчанике подошвы на участке “Север”; д – обломочный материал в песчанике кровли на участке “Юг”; е – цемент поровый карбонатный кристаллический в песчанике кровли на участке “Север”; ж – цемент поровый карбонатный кристаллический с примесью гидроокислов железа в песчанике кровли на участке “Север”.



**Рис. 6.** Содержания РЗЭ, нормированных по хондриту [6]: а – в “ранних” массивах пород Каахемского гранитоидного батолита [3, 4]: 1 – Коптинского ( $n = 4$ ), 2 – Байсютского ( $n = 3$ ); б – в “поздних” массивах пород Каахемского гранитоидного батолита [3, 4]: 3 – Зубовского ( $n = 3$ ), 4 – Раннетаннуольского ( $n = 4$ ), 5 – Позднетаннуольского ( $n = 3$ ), 6 – Сархойского ( $n = 6$ ), 7 – Чарашского ( $n = 9$ ); в – в углевмещающих породах Каа-Хемского месторождения: 8 – Каахемского гранитоидного батолита ( $n = 34$ ) [3, 4], 9 – песчаник кровли, 10 – песчаник подошвы, 11 – зола угля пл. 2.2-Улуг.

мального изменения и низкотемпературного метаморфизма [13].

Диаграммы распределения РЗЭ в коптинском ( $V-\epsilon_1$ ), байсютском ( $\epsilon_1$ ), зубовском ( $\epsilon_{2-3}$ ), сархойском ( $O_3$ ), чарашском ( $O_1$ ), ранне ( $O_1$ )- и поздне ( $O_3$ ) таннуольском (нерасчлененные) массивах Каахемского гранитоидного батолита построены с использованием данных, опубликованных в [1, 3, 4]. Анализ спектр-диаграмм показывает, что в интрузивных ассоциациях *коптинского* и *байсютского* тоналит-плагиогранитных комплексов нормированные содержания легких и тяжелых лантаноидов находятся примерно на одном уровне, имеются минимумы у Tm и Eu (рис. 6, а). Спектры РЗЭ в интрузивах зубовского, сархойского, чарашского, ранне- и поздне таннуольского комплексов схожи между собой по явному преобладанию легких лантаноидов над тяжелыми и наличию минимумов по Tm и Eu (рис. 6, б).

Спектр распределения усредненных содержания РЗЭ в Каахемском полихронном гранитоидном батолите ( $n = 34$ ) показан на рис. 6, в (кривая 8), там же для сравнения приведены спектры распределения РЗЭ в образцах угольного пласта ( $n = 2$ ), кровли ( $n = 2$ ) и подошвы ( $n = 2$ ). Анализ диаграмм показывает следующее:

1) распределения РЗЭ в угольном пласте, углевмещающих отложениях и породах обрамления сходны по явному преобладанию легких лантаноидов над тяжелыми и наличию отчетливого минимума у Tm и менее заметного у Eu,

2) в сравнении с породами обрамления, угольный пласт и песчаник его подошвы обогащены всеми РЗЭ, только уровень обогащения тяжелыми лантаноидами выше (содержания элементов повышены в  $\sim 1.5-2$  раза), чем легкими (на  $\sim 30\%$ ),

3) песчаник кровли, в сравнении с породами обрамления, обеднен всеми РЗЭ в среднем на  $\sim 20\%$ .

На основе сходства спектров распределения РЗЭ в угольном пласте, углевмещающих отложениях и гранитоиде обрамления можно сделать заключение, что источниками сноса обломочного материала исследуемой угленосной толщи явились в основном интрузивные ассоциации Каахемского полихронного гранитоидного батолита. Дополнительным доказательством данного заключения является присутствие в образцах подошвы и кровли угольного пласта обломков пород преимущественно кислого состава и характерных для них минералов [3, 4]: кварц, калишпат-пертиты, биотит, акцессорные циркон, рутил, микрограниты, риолиты, кремнисто-гидрослюдистые сланцы, кварциты. Полученный вывод дополняет и уточняет результаты литолого-фациального анализа угленосных отложений Улуг-Хемского бассейна [9] о роли (участии) пород ближайшего обрамления в формировании неорганического вещества углей на Каа-Хемском месторождении.

## ВЫВОДЫ

Анализ распределения золообразующих элементов в угольном пласте 2.2.-Улуг Каа-Хемского месторождения показывает, что зола неокисленного и полуокисленного угля железисто(16; 19%)-кальциево(16; 22%)-кремнистая(37; 30%), в окисленных углях глиноземисто(21%)-кремнистая (56%). В гипергенезе тип золы изменяется с гидролизатного ( $GM_{cp} = 1.40$ ) на сиаллитный ( $GM_{cp} = 0.49$ ). Величина ГМ золы угля увеличивается в направлении с востока на запад и/или по мере возрастания мощности угольного пласта (от 1.0 до 11.2 м) и его глубины залегания (от 20.8 до 366.6 м).

Внутрипластовый породный прослой угля (мощность 3–5 см) представлен кальцитом хемогенной природы. Благоприятные для осаждения карбонатов условия сформировались в краевых частях бассейна торфо-, осадконакопления, вероятно, в период ослабления режима их обводнения.

Результаты сопоставительного анализа нормированных по хондриту спектров распределения РЗЭ в углях, углевмещающих отложениях и породах обрамления указывают на то, что источниками сноса обломочного материала в Каа-Хемском угольном месторождении являются интрузивные ассоциации в составе Каахемского полихронного гранитоидного батолита.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания ТувИКОПР СО РАН, финансируемого Министерством науки и высшего образования Российской Федерации проект № АААА-А17-117072710020-4.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Угольная база России. Т. III. Угольные бассейны и месторождения Восточной Сибири. Южная часть. М.: ООО "Геоинформцентр", 2002. 488 с.
2. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Алтае-Саянская Лист М-46 – Кызыл. Объяснительная записка.— СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2008. 349 с. + 8 вкл. (Мин-природы России, Роснедра, ФГУП "ВСЕГЕИ", ФГУП "Красноярскгеолсъемка").
3. Руднев С.Н. Раннепалеозойский гранитоидный магматизм Алтае-Саянской складчатой области и Озерной зоны Западной Монголии. Отв. ред. Г.В. Поляков. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013. 300 с.
4. Руднев С.Н., Серов П.А., Киселева В.Ю. // Геология и геофизика. 2015. Т. 56. № 9. С. 1572. [Russian Geology and Geophysics, 2015. vol. 56. no. 9, p. 1232. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2015.08.002>]
5. Рухин Л.Б. Основы литологии. 3-е изд. Л., Недра, 1969. 703 с.
6. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Основы литохимии. СПб.: Наука, 2000. 479 с.
7. Янчат Н.Н., Тас-оол Л.Х. // ХТТ. 2008. № 4. С. 54. [Solid Fuel Chemist, 2008, vol. 42, no. 4, p. 241. <https://doi.org/10.3103/S0361521908040101>]
8. Юдович Я.Э., Кетрис М. П. Неорганическое вещество углей. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 424 с.
9. Тимофеев П.П. Юрская угленосная формация Тувинского межгорного прогиба. Тр. ГИН АН СССР. Вып. 94. М.: Наука, 1964. 260 с.
10. Babangida M. Sarki Yandoka, Wan Hasiah Abdullah, Abubakar M.B., Mohammed Hail Hakimi, Adebani Kayode Adegoke // Geochemistry of the Cretaceous coals from Lamja Formation, Yola Sub-basin, Northern Benue Trough, NE Nigeria: Implications for paleo-environment, paleoclimate and tectonic setting// Journal of African Earth Sciences 104 (2015) 56–70. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2015.01.002>
11. Минералогия горелых отвалов Челябинского угольного бассейна (опыт минералогии техногенеза) / Б.З. Чесноков, Е.П. Щербакова. М.: Наука, 1991. 152 с.
12. Потапов С.С., Максимович Н.Г., Паршина Н.В. Список минералов горелых отвалов Челябинского и Кизеловского угольных бассейнов // Минеральное сырье Урала, 2006. № 6 (10). С. 43.
13. Скляр Е.В., Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Иванов А.В., Летникова Е.Ф., Миронов А.Г., Бараш И.Г., Буланов В.А., Сизых А.И. Интерпретация геохимических данных: Учеб. пособие / Под ред. Е.В. Склярова. М.: Интернет Инжиниринг, 2001. 288 с.