

УДК 553.078

ЛИТОХИМИЯ ЗОЛ УГЛЕЙ МИНУСИНСКОГО БАСЕЙНА

В.В. Ершов, С.И. Арбузов, Н.Е. Дубовик*, Е.П. Ермолова**, С.С. Ильенко

Томский политехнический университет

*Территориальное агентство по недропользованию по Республике Хакасия, г. Абакан

**ОАО «Берег», г. Абакан

E-mail: erchovv@mail.tomsknet.ru

Изучен и обсуждается макрокомпонентный состав золы углей Минусинского бассейна. Показана стратиграфическая и латеральная неоднородность химического состава золы углей отдельных пластов и месторождений. Выделены основные факторы, определяющие литохимические особенности золы углей бассейна.

Ключевые слова:

Зола угля, литохимия, Минусинский бассейн, пирокластика.

Как отмечают Я.Э. Юдович и М.П. Кетрис литохимия (по аналогии с петрохимией) – «часть геохимии, которая трактует вопросы валового химического состава осадочных горных пород и их аналогов» [1]. Это направление в последние годы активно развивается, растет число работ, в которых с применением литохимических методов, решается широкий круг геологических задач.

Содержания породообразующих окислов в золах углей всегда интересовало специалистов угольной отрасли в первую очередь с точки зрения технологии сжигания угля и переработки золошлаков, их оценка стала обязательной при определении марочного состава углей. Был накоплен большой фактический материал, который, к сожалению, мало используется при геохимических построениях и редко публикуется в открытой печати.

В процессе работ по установлению марочного состава углей Минусинского бассейна, нами были опробованы угли четырех месторождений, эксплуатируемых или пригодных для эксплуатации: Черногорского, Изыхского, Бейского и Аскизского. Микроэлементный состав углей бассейна изучался нами в течение ряда лет, была установлена их редкометаллическая и благороднометаллическая специализация, оценены ресурсы некоторых ценных элементов в отдельных пластах [2, 3 и др.]. Однако данные по содержанию породообразующих компонентов в золах углей обсуждаются впервые.

Минусинский угольный бассейн расположен в центральной части Алтае-Саянской складчатой

области в пределах одноименного прогиба. Бассейн характеризуется небольшими размерами и благоприятными условиями эксплуатации, позволяющими вести добычу угля на значительной части его территории открытым способом. Согласно административно-территориальному делению он расположен в пределах Республики Хакасия и представлен группой из десяти разрозненных месторождений. Геолого-промышленная характеристика бассейна подробно изложена в фундаментальном обобщении «Угольная база России» [2]. Суммарная мощность угленосных отложений достигает 1800 м. Угленосная толща подразделяется на 6 свит, изыхская и нарыльковская свиты относятся к нижней перми, белоярская, побережная, черногорская, сарская к среднему – верхнему карбону. В черногорской свите содержится от 6–7 (Изыхское и Черногорское месторождения) до 14 и более (Бейское и Аскизское месторождения) угольных пластов промышленной мощности. На Изыхском и Бейском месторождениях сохранились все угленосные свиты, на Черногорском и Аскизском – только нижняя часть разреза. Верхняя часть разреза, представленная белоярской, нарыльковской и изыхской свитами, содержит до 30 угольных пластов и характеризуется максимальной для бассейна угленосностью. На Изыхском месторождении отрабатываются пласты нарыльковской и изыхской свит. На Бейском (участок Чалпан) – пласты черногорской свиты. Угли Черногорского, Бейского и Изыхского месторождений сформированы в прибрежных, а Аскизского – в прибрежно-аллювиальных условиях [2].

Угли бассейна энергетические, в основном длиннопламенные и в меньшей степени газовые, газовой-жирные (Аскизское месторождение), низко- и высокосольные.

Тектоническое строение угольных месторождений бассейна простое. Угольные пласты залегают субгоризонтально. В редких случаях проявлена приразломная складчатость. Важной особенностью является наличие в углях и углевмещающих породах продуктов вулканической деятельности, наиболее ярко представленных тонштейнами [5, 6].

Методика исследования

Опробование проводилось по керну скважин, реже в бортах угольных разрезов, методом сплошной борозды. Было проведено комплексное изучение проб, с определением широкого круга микроэлементов, кроме того, были изучены теплотехнические характеристики угля и проведен полный химический анализ проб золы угля на основные золообразующие окислы. Причем для Аскизского месторождения детальное опробование было выполнено впервые.

Анализ 77 проб золы угля на основные золообразующие окислы выполнен в лаборатории Западно-Сибирского испытательного центра (г. Новокузнецк). Средние данные по содержаниям компонентов в угольных пластах и месторождениях приведены в таблице.

Оценка средних производилась как средневзвешенное по мощности. По результатам анализов были рассчитаны основные литохимические модули: ГМ – гидролизатный $(\text{TiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{MnO})/\text{SiO}_2$; ТМ – титановый $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$; ЖМ – железный $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{MnO})/(\text{TiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$; ФМ – фемический $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{MnO} + \text{MgO})/\text{SiO}_2$; НКМ – модуль нормированной щелочности $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3$; АМ – алюмокремниевый $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$; ЩМ – щелочной $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ [1], естественно, модифицированные для золы, так как в золах углей железо находится в форме Fe_2O_3 , марганец в форме Mn_2O_3 . Для сравнительного сопоставления привлечены данные по месторождению Хотгор, локализованному в разновозрастных породах на северо-западе Монголии (Монгольский Алтай), поскольку в этом регионе в это время в ближайшем обрамлении от месторождения была активно проявлена вулканическая активность. Ряд авторов [8, 9 и др.] считают источником пеплового материала в осадках Минусинского прогиба именно вулканы Монголии и Алтая.

Результаты исследований и их обсуждение

Анализируя средние уровни накопления макроэлементов для отдельных месторождений, следует отметить, что золы углей Бейского и Черногорского месторождений отличаются наибольшей глинозёмистостью и повышенным содержанием титана, при наименьшей кремнекислотности и калиево-натриево-содержании, причем в последних установлены максимальные концен-

трации окислов кальция, магния, фосфора, натрия. Это обусловило наибольшие значения щелочного, фемического, алюмокремниевый и гидролизатного модулей для этих месторождений (рис. 1). Золы углей Изыхского месторождения характеризуются наименьшими концентрациями титана и, соответственно, титанового модуля, низкими содержаниями магния и высокими – серы. Золы углей Аскизского месторождения отчетливо отличаются максимальными средними концентрациями оксидов калия и кремния, при наибольшем значении модуля нормированной щелочности. Для них характерны минимальные содержания оксидов натрия и соответственно, значение щелочного модуля, кальция, железа, серы, фосфора. Золы углей месторождения Хотгор, по сравнению с Минусинскими, являются в среднем (по значению медианы) более кремнекислотными, они менее глинозёмисты, беднее кальцием и содержат меньшие количества титана, фосфора, натрия. Их состав обусловил существенно меньшие значения гидролизатного, алюмокремниевый, фемического модулей. Любопытно, что значение щелочного модуля практически совпадает с таковым для Минусинского бассейна, хотя сумма щелочей ниже. Тонштейны Черногорского месторождения (по данным [7]) являются низкотитанистыми, низкожелезистыми, в них мало кальция и магния, относительно повышено содержание глинозема. В соответствии с химической классификацией осадочных пород [1] они являются нормогидролизатами. При общей низкой щелочности, содержания калия в них превышают содержания натрия, то есть значения ЩМ меньше 1 и приближаются к средним оценкам для Аскизского месторождения. Значение алюмокремниевый модуля подтверждает их преимущественно каолинистый состав.

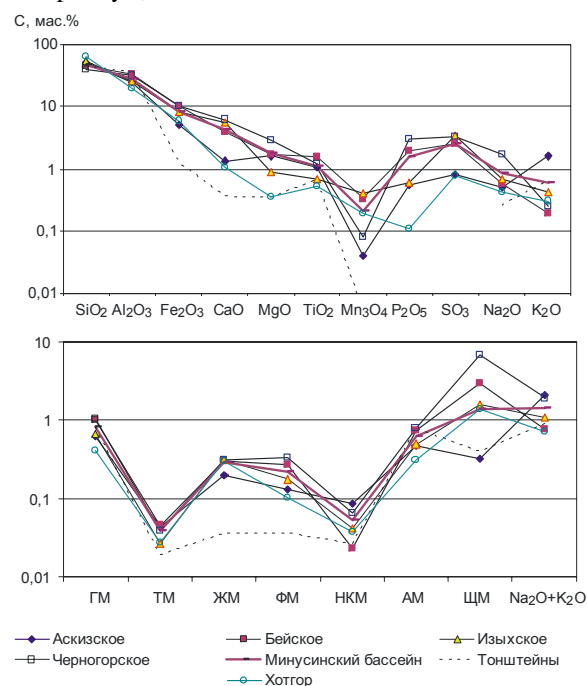


Рис. 1. Средние содержания макрокомпонентов и значения литохимических модулей в золах углей и тонштейнов

Таблица. Химический состав золы угля Минусинского бассейна

Название пласта	Содержание золообразующих окислов, %											A ^d , %
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	Mn ₃ O ₄	P ₂ O ₅	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	
Аскизское месторождение												
21	58,14	29,21	5,28	1,19	1,81	1,34	0,05	0,15	0,89	0,65	1,17	15,8
20	58,17	25,11	7,74	1,74	2,62	1,30	0,07	0,15	1,03	0,39	1,78	23,3
б/и	41,00	35,20	2,63	4,89	0,78	0,95	0,02	10,30	1,20	0,53	0,96	11,2
19	57,96	28,84	4,61	1,89	2,04	1,28	0,03	0,32	1,45	0,29	1,30	20,8
18	60,46	29,76	3,40	0,87	1,72	1,24	0,01	0,11	0,24	0,50	2,05	19,0
17	55,98	31,70	6,87	0,20	0,78	1,38	0,04	0,08	0,40	0,73	1,27	13,1
16 ^a	59,68	33,85	2,02	0,20	1,01	1,15	0,02	0,11	0,30	0,40	1,32	23,7
16	61,85	25,68	4,10	0,71	2,48	1,24	0,02	0,16	0,40	0,26	2,52	29,4
15	58,10	29,34	3,44	2,07	2,14	1,76	0,02	0,57	0,94	0,32	1,19	25,8
14	61,56	26,54	3,56	0,54	2,66	1,43	0,02	0,11	0,31	0,30	2,89	31,9
13	54,94	29,22	5,88	3,48	1,72	1,79	0,01	0,56	1,57	0,38	0,63	12,2
12 ^a	52,08	25,20	15,01	0,40	1,66	1,37	0,15	0,14	0,49	0,75	1,43	10,4
12	62,82	23,32	4,57	0,20	2,93	1,03	0,05	0,07	0,11	0,73	2,97	54,0
б/и	54,00	34,74	3,49	1,30	1,01	1,33	0,03	0,40	0,64	0,65	1,11	15,3
11	61,70	23,08	8,60	0,38	1,94	1,06	0,06	0,12	0,33	0,65	1,75	25,6
б/и	58,00	33,00	4,20	0,20	0,82	1,16	0,01	0,13	0,15	0,54	1,22	26,8
10	59,32	25,52	7,35	0,65	2,61	1,34	0,07	0,18	0,20	0,76	2,27	35,6
б/и	62,28	25,42	3,52	0,70	2,81	1,02	0,04	0,08	0,58	0,75	2,51	36,6
9	57,35	31,63	2,55	1,93	0,50	1,63	0,01	1,77	0,16	0,73	0,67	5,9
8	49,41	27,14	16,00	0,40	1,54	1,07	0,13	0,57	0,08	0,53	2,17	22,8
7	59,26	31,55	3,09	0,87	1,64	1,29	0,01	0,13	0,22	0,70	1,53	26,9
б/и	63,63	24,38	3,72	0,20	2,13	1,09	0,22	0,35	0,04	0,74	2,45	35,2
б/и	61,69	26,34	4,20	0,20	2,40	0,93	0,03	0,10	0,12	0,69	3,42	38,9
6 ^a	49,73	29,24	4,21	3,66	3,05	1,24	0,04	1,54	4,82	1,05	1,35	33,8
б/и	38,68	18,38	24,60	10,08	0,99	0,66	0,01	0,25	4,36	0,36	1,29	25,7
6	61,16	28,04	3,20	1,14	1,00	1,21	0,01	0,19	1,49	0,44	1,87	23,5
б/и	60,30	29,20	2,13	2,58	1,00	1,00	0,03	0,09	1,48	0,36	1,72	27,6
5	63,09	22,66	4,92	0,66	2,62	0,96	0,04	0,08	1,51	0,50	2,74	35,3
4	62,41	24,36	5,03	1,45	2,11	1,02	0,03	0,06	0,38	1,26	1,53	39,2
1	61,21	30,12	3,02	0,65	1,02	1,55	0,02	0,13	0,22	0,37	1,80	22,75
0	61,79	26,58	3,88	1,08	1,99	1,38	0,02	0,13	2,43	0,20	2,40	26,56
Среднее*	51,08	24,70	5,05	1,33	1,59	1,09	0,04	0,55	0,82	0,50	1,58	22,70
Бейское месторождение												
19 ^a	35,5	23,0	28,3	4,4	2,6	0,9	0,24	1,4	2,5	0,27	0,33	5,7
19 ^a	43,7	33,0	5,2	6,8	3,0	0,9	0,22	1,0	6,0	0,13	0,12	7,5
19/	40,1	33,9	5,0	8,9	1,4	1,5	0,56	5,0	3,0	0,37	0,15	2,5
18	36,4	20,2	19,9	7,9	4,8	0,8	0,25	1,4	7,6	0,23	0,30	10,8
16 ^a	47,4	35,3	8,4	1,6	1,2	1,8	0,34	1,3	1,3	0,86	0,17	3,0
16/	49,7	34,7	11,2	0,5	0,8	1,6	0,11	0,1	0,5	0,14	0,22	11,9
Среднее*	44,3	32,8	10,0	4,0	1,7	1,5	0,34	1,9	2,5	0,56	0,19	4,7
Изыхское месторождение												
XXX ⁶	67,08	19,92	3,25	2,71	0,87	0,66	0,07	0,39	2,07	1,01	0,55	12,8
XXX ^a	55,81	30,79	4,55	2,72	0,86	0,61	0,18	0,44	1,34	0,72	0,7	14,1
XXX	48,9	24,85	4,5	11,36	0,85	0,56	0,14	1,4	5,21	0,65	0,5	16,2
XXVIII	48,72	27,89	11,99	3,79	0,9	0,74	0,69	0,21	3,24	0,58	0,28	17,6
Среднее*	52,41	25,86	7,90	5,65	0,88	0,67	0,40	0,59	3,46	0,68	0,42	16,1
Черногорское месторождение												
Двухаршинный	42,0	35,0	5,1	5,5	3,3	1,3	0,04	3,9	1,3	1,2	0,31	4,4
Великан-I	35,7	20,3	13,6	15,2	2,7	1,2	0,13	7,8	1,6	0,7	0,84	4,6
Великан-II	38,5	30,6	12,2	6,5	3,2	1,6	0,08	2,7	2,7	0,7	0,25	5,2
Безымянный	31,3	24,3	17,4	7,7	5,8	1,0	0,10	3,7	5,8	3,1	0,08	4,7
Мощный	45,8	36,8	3,0	4,4	1,3	1,3	0,01	2,8	2,0	2,2	0,11	9,9
Гигант-I	39,8	30,6	8,9	5,9	3,2	1,0	0,08	1,8	5,4	2,4	0,31	4,4
Гигант-II	34,9	26,2	20,5	3,9	2,9	0,9	0,25	1,6	6,2	1,9	0,21	5,2
Среднее*	39,6	30,8	10,0	6,2	2,9	1,2	0,08	3,0	3,3	1,7	0,25	6,6
Среднее для бассейна	46,8	28,5	8,2	4,3	1,8	1,1	0,22	1,5	2,5	0,86	0,6	12,5

Примечание: Среднее рассчитано как средневзвешенное по мощности, б/и – без индекса, A^d – зольность

В разрезе угленосных отложений макрокомпоненты распределены в золах углей достаточно неравномерно (таблица), что приводит к значительным вариациям литохимических модулей. Наибольшие значения ГМ (1,5...1,4) характерны для пластов 19^а (Бейское месторождение), Великан-II, Безымянный, Гигант-II (Черногорское). В золах этих пластов повышено содержание железа и относительно низки концентрации SiO_2 . Минимальные значения гидролизатного модуля (0,4...0,5) в золах пластов XXX^б (Изыхское месторождение) и 5 (Аскизское), отличающихся наибольшими средними содержаниями кремнезема. АМ достигает 0,83...0,86 в золах пластов 19^а (Бейское месторождение), Двухаршинный (Черногорское), пласте спутнике 19 (без индекса) (Аскизское). Значения АМ минимальны (0,3) в золах пласта XXX^б (Изыхское месторождение). Титановый модуль достигает значений 0,6 в золах пластов 13, 15 (Аскизское месторождение) и Великан-I (Черногорское), его наименьшие уровни (0,2) характеризуют пласты XXX, XXX^а (Изыхское месторождение). Железный модуль максимален (1,2...1,3) в золах пласта спутника 6 (без индекса) в низах черногорской свиты Аскизского месторождения и пласта 19^а Бейского месторождения. Его наименьшие значения составляют 0,06...0,07 в пластах 16^а и спутнике 5 (без индекса) (верхняя часть сарской свиты Аскизского месторождения). ФМ достигает максимума (0,74...0,88) в пластах 19^а (Бейское месторождение) и Безымянный. Его наименьшее значение (0,05) зафиксировано в пластах 9, 16^а Аскизского месторождения. Уровни НКМ отчетливо коррелируют с общей щелочностью, они максимальны в золах пласта спутника 6^а (без индекса), 12 (Аскизское месторождение). Наименее щелочными являются зола углей пластов 16^а, 19^а, 19^б Бейского месторождения. Щелочной модуль наиболее высок для Черногорского месторождения, он достигает 39 в пласте Безымянный, где содержания Na_2O составляют 3,1 %, а K_2O всего 0,08 %. Наименьшие значения ЩМ характеризуют зола углей пластов Аскизского месторождения. Здесь он превышает 1 только в малозольном пласте 9, который кроме того отличается относительно повышенными концентрациями окисей фосфора и титана (табл. 1).

Неравномерным является распределение макрокомпонентов в золах углей и в разрезе пласта. Очень значительно могут варьировать концентрации железа, кальция и магния. Так, например, в верхней части пласта Великан-II в золах углей концентрации Fe_2O_3 достигают 36 %, что приводит к аномально высоким значениям ФМ, ЖМ и ГМ (рис. 2). Здесь же повышены содержания кальция, магния и фосфора. Обращает на себя внимание факт наличия относительно повышенных концентраций калия в средней, более высокзольной части пласта, где значение ЩМ ниже 1 (случай весьма редкий для зол углей Черногорского месторождения). Зола углей пласта 15 (Аскизское месторождение) расположенного на том же уровне, что и Великан-II, отличаются существенно меньшими

вариациями содержаний макрокомпонентов, они более калиевы и кремнекислотны, менее железисты. Значения основных модулей здесь практически не зависят от зольности (рис. 3), которая в верхней части пласта возрастает почти в три раза, что вероятно свидетельствует об определяющем вкладе кластогенной составляющей и в золе относительно малозольных углей этого пласта.

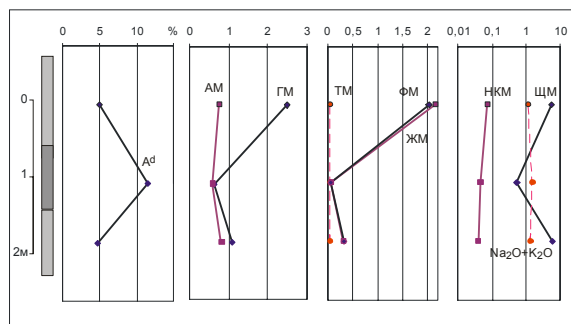


Рис. 2. Распределение зольности и значений литохимических модулей в разрезе пласта Великан-II Черногорского месторождения

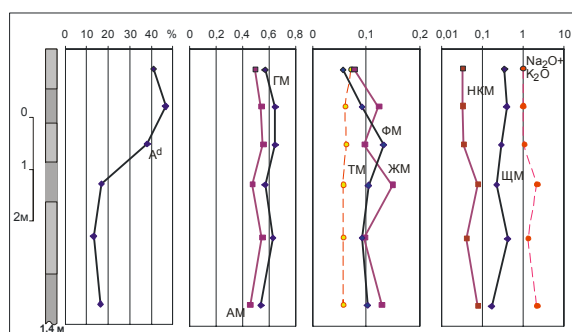


Рис. 3. Распределение зольности и значений литохимических модулей в разрезе пласта 15 Аскизского месторождения

Анализируя уровни накопления макрокомпонентов и значения литохимических модулей в золах всей совокупности угольных проб бассейна, следует отметить, что наиболее отчетливо они дифференцируются по значениям алюмокремниевому и щелочному модулям (рис. 4, а). На рисунке видно, что только одна проба Аскизского месторождения имеет значение ЩМ больше 1 и одна — значение АМ свыше 0,8. И лишь две пробы Черногорского месторождения характеризуются значениями ЩМ, меньшими 1. То есть область перекрытия очень невелика. Зола углей Бейского месторождения занимают промежуточное положение между Черногорскими и Аскизскими, что хорошо согласуется с географическим положением месторождения. Обособились на графике и пробы Изыхского месторождения, характеризующие вышележащие свиты пермского возраста. Положение точек, характеризующих тонштейны, дает возможность оценить возможное влияние пеплового материала на состав золы. По всей видимости оно выражается, в первую очередь, в повышении концентраций глинозема, что приводит к повышению значений АМ.

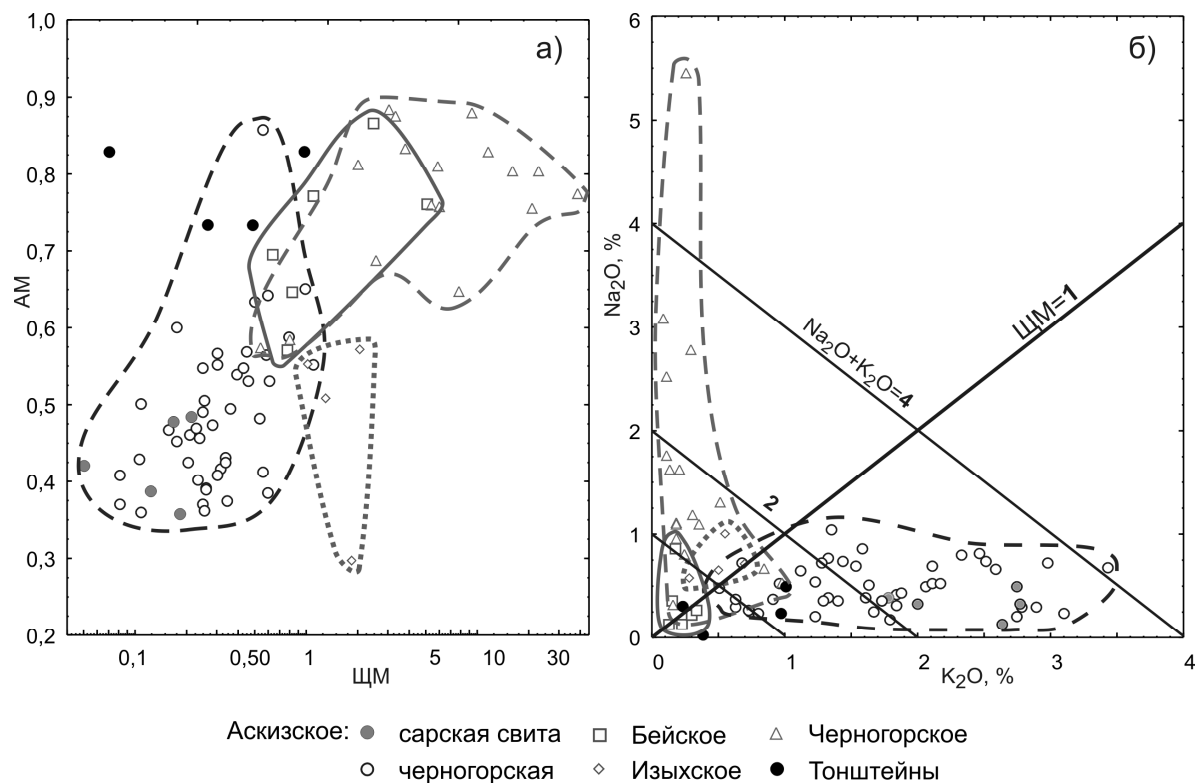


Рис. 4. Положение зол углей бассейна в координатах: а) $AM - ЩМ$; б) $Na_2O - K_2O$

Важно, что устанавливаются положительные корреляционные связи между значениями AM и содержаниями фосфора, редких земель, скандия, тория и др. редких элементов, одним из источников которых мог быть вулканогенный материал [3].

Рассматривая более детально вариации щелочности (рис. 4, б) необходимо подчеркнуть, что при повышенной общей щелочности золы углей Черногорского и Аскизского месторождений, первые отличаются натровой, а вторые калиевой специализацией. На этом рисунке также видно промежуточное положение точек Бейского и Изыхского месторождений.

Встаёт вопрос о причинах подобных различий в макрокомпонентном составе золы. Естественно, в первую очередь необходимо оценить влияние величины зольности углей. Для проб каменноугольного возраста просматривается выраженная обратная зависимость между зольностью и значениями алюмокремниевому модуля. То есть пробы с повышенной зольностью Черногорского и Бейского месторождений характеризуются наиболее низкими значениями AM (рис. 5, а), а наименее зольные пробы в целом высокзольных Аскизских углей содержат большие количества глинозема, что выражается в более высоких значениях AM . Для проб Изыхского месторождения такой связи не просматривается. Тот же характер зависимости, но менее отчетливый, выражается и в координатах зольность — щелочной модуль (рис. 5, б), то есть в пробах с низкой зольностью натрия преобладает над калием.

Известно, что калий более биофилен, чем натрий. Современные растения в большей степени накапливают K чем Na , так же и современные торфяники и торфяные почвы преимущественно обогащены калием, т. е. значения $ЩМ$ в них меньше 1 ((0,08...0,75) — рассчитано по данным В.В. Ковальского, В.А. Ковалёва, Д.П. Малюги, А.П. Виноградова, С.А. Кудрина [10], А.В. Пичугина [11], М.Я. Шпирта и др. [12]).

Таким образом, если предполагать, что состав $A_{\text{био}}$ древних растений и палеоторфяников отвечал составу золы современных растений и торфов можно утверждать, что в процессе формирования малозольных углей бассейна происходил существенный вынос калия. Я.Э. Юдович [13] отмечает, что уже в торфянике происходит мощный процесс селективного растворения биогенной составляющей золы.

По всей видимости, калий, как и кремнезем, мог активно мигрировать за пределы пластов. И последующее его накопление (или его отсутствие) объясняется другими факторами (сорбцией, составом кластогенной примеси). То же может относиться и к натрию.

Резкие различия в уровнях накопления натрия заставляют подробнее рассмотреть и накопление других, возможно связанных с ним элементов. Установлено, что месторождения, золы углей которых являются более натриевыми, характеризуются высокими концентрациями хлора, магния, бора, серы (рис. 6).

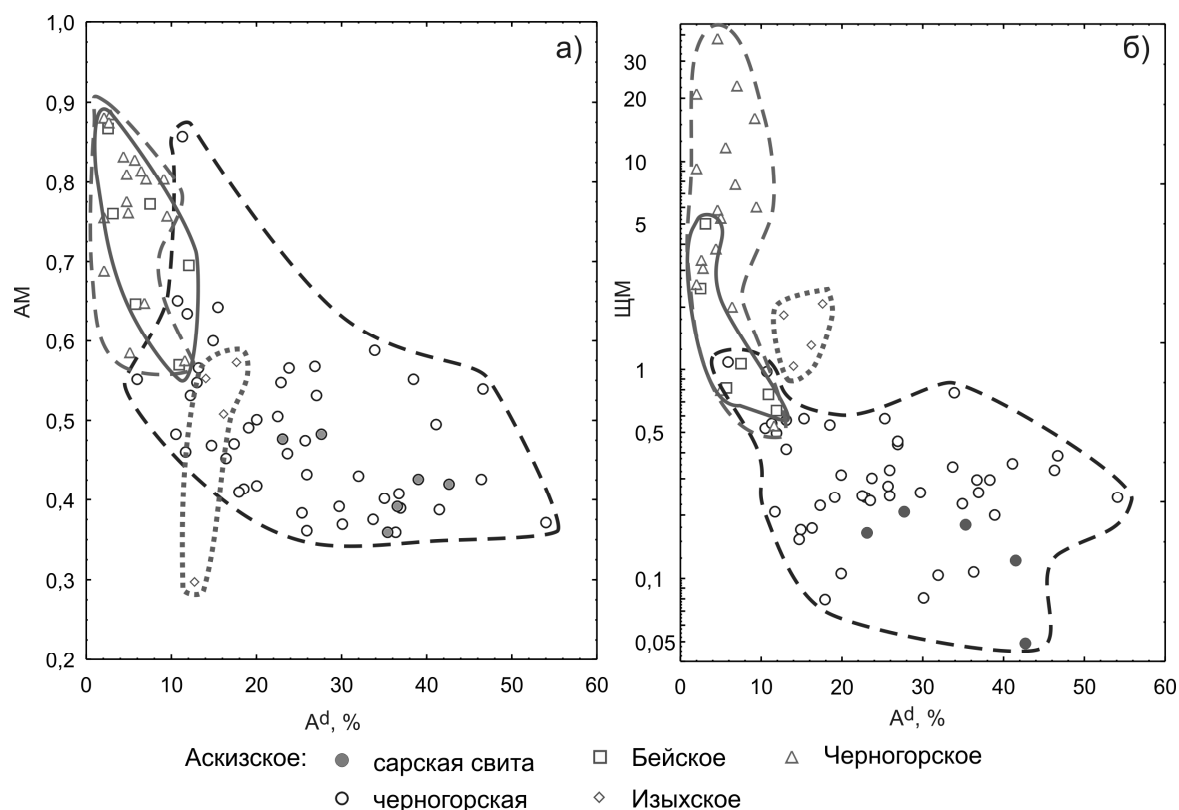


Рис. 5. Зависимость значений модулей от зольности: а) АМ; б) ШМ

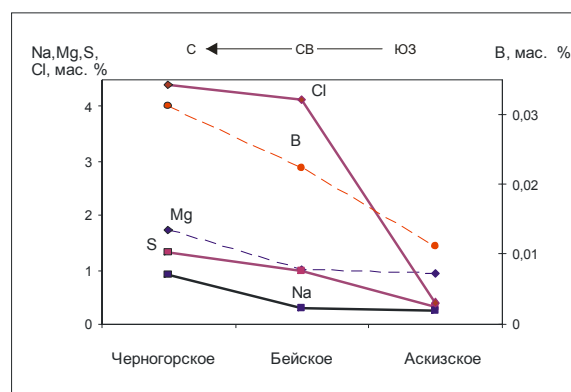


Рис. 6. Содержания натрия, хлора, магния, бора и серы в золах углей черногорской свиты различных месторождений бассейна

Природа повышенной натровости и аномальное накопление хлора в углях северной части бассейна, могли быть обусловлены инфильтрацией грунтовых вод повышенной солености в современном аридном климате. Однако связь натрия с хлором, бором, магнием и серой не исключает возможности сингенетичной «засоленности» прибрежных палеоторфяников [13]. Поскольку морских отложений в угленосном разрезе не зафиксировано, не исключено, что источником поступления натрия, хлора и других, в том числе редких элементов [2] в воды палеобассейнов были вулканические эксгаляции и вулканы, на пространственную близость которых к области осадконакопления указывал А.В. Ван [14].

Выводы

Зола углей Минусинского бассейна дифференцированы по содержаниям макрокомпонентов и, соответственно, по значениям литохимических модулей. Эти отличия проявлены как по латерали, так и в стратиграфическом разрезе.

Одним из наиболее важных факторов, определяющих состав зола, являлись фациальный и палеогеографический. Так, близкорасположенные разновозрастные Черногорское и Аскизское месторождения, первое из которых было сформировано в прибрежных условиях (берег палеобассейна), а второе в переходных прибрежно-аллювиальных (удалено от палеобассейна), контрастно отличаются по макрокомпонентному составу зола и значениям литохимических модулей.

Влияние пирокластического материала наиболее наглядно проявляется для низкозольных углей; в более зольных разностях оно может быть закамуфлировано влиянием терригенной составляющей зола.

Установленная повышенная глиноземистость наименее зольных углей, часто обогащенных редкими и редкоземельными элементами, может служить благоприятным фактором при их комплексной переработке.

Натровая специализация зол углей (высокие значения щелочного модуля) может служить признаком «солености» углей и повышенных концентраций такого технологически вредного компонента, как хлор.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Основы литохимии. – СПб.: Наука, 2000. – 400 с.
2. Арбузов С.И., Ершов В.В., Рихванов Л.П., Кяргин В.В., Булатов А.А., Дубовик Н.Е. Редкометалльный потенциал углей Минусинского бассейна. – Новосибирск: Изд-во СО РАН. Филиал «ГЕО», 2003. – 300 с.
3. Арбузов С.И., Ершов В.В. Геохимия редких элементов в углях Сибири. – Томск: Изд. дом «Д-принт», 2007. – 468 с.
4. Угольная база России. Том III. Угольные бассейны и месторождения Восточной Сибири (южная часть) / Под ред. В.Ф. Череповского. – М.: ООО «Геоинформцентр», 2002. – 488 с.
5. Адмакин Л.А. Типы тонштейнов в угольных пластах Минусинского бассейна // Литология и полезные ископаемые. – 1992. – № 2. – С. 49–56.
6. Ван А.В. Вулканогенный пепел в угленосных отложениях верхнего палеозоя Средней Сибири // Литология и полезные ископаемые. – 1972. – № 1. – С. 40–51.
7. Петрография углей СССР / Под ред. И.Б. Волковой. Труды ВСЕГЕИ. – Т. 333. Новая серия. – Л.: Недра, 1986. – 246 с.
8. Грайзер М.Н. К вопросу о нижнекарбонном вулканизме юга Сибири и Монгольской Народной Республики // Доклады АН СССР. – 1963. – Т. 152. – № 6. – С. 1424–1428.
9. Богомазов В.М. Стратиграфия и условия образования доугленосных и угленосных отложений карбона и перми Минусинского бассейна // Вопросы геологии угленосных отложений азиатской части СССР. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1961. – С. 79–116.
10. Справочник по геохимии / Под ред. Г.В. Войткевич. – М.: Недра, 1990. – 480 с.
11. Пичутин А.В. К вопросу о минеральном режиме торфяных месторождений // Торфяная промышленность. – 1947. – № 7. – С. 19–22.
12. Шпирт М.Я., Клер В.Р., Перциков И.З. Неорганические компоненты твердых топлив. – М.: Химия, 1990. – 240 с.
13. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Неорганическое вещество углей. – Екатеринбург: УрО РАН, 2002. – 422 с.
14. Ван А.В. О месторасположении источников пеплового материала в угленосных отложениях верхнего палеозоя Кузнецкого бассейна // Труды СНИИГГМС. – Новосибирск, 1973(6). – Вып. 170. – С. 111–113.

Поступила 28.02.2008 г.