

УДК 552.57, 552.52

МИНЕРАЛОГИЯ И ГЕОХИМИЯ ТОНШТЕЙНОВ В УГЛЯХ БЕЙСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ МИНУСИНСКОГО БАСЕЙНА

Вергунов Алексей Викторович¹,
alexseivergunov@rambler.ru

Арбузов Сергей Иванович¹,
siarbusov@mail.ru

Соболенко Виктор Михайлович²,
v.sobolenko@arshanovskiy.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

² ОАО «Разрез Аршановский»,
Россия, 655016, г. Абакан, ул. Лермонтова, 20.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью оценки влияния вулканогенного пирокластического материала на формирование геохимического фона редких элементов в угле.

Цель: изучить минералого-геохимические особенности тонштейнов и вмещающих углей черногорской свиты Бейского месторождения Минусинского бассейна.

Объекты: тонштейны и вмещающие угли черногорской свиты Бейского месторождения Минусинского угольного бассейна.

Методы: опробование угольных пластов черногорской свиты Бейского месторождения; химический состав определен методами масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP MS), инструментальным нейтронно-активационным анализом, рентгенофлуоресцентным анализом; минеральный состав изучен методами оптической микроскопии, петрографического анализа, сканирующей электронной микроскопии, рентгеновской дифрактометрии.

Результаты. Рассмотрены минералого-геохимические особенности тонштейнов черногорской свиты Бейского месторождения Минусинского угольного бассейна. Среди тонштейнов Бейского месторождения выделяются две разновидности: 1. тонштейны каолинитового (70–100 %) состава, 2. тонштейны смешанного состава. Единичные каолинитовые прослои характеризуются содержаниями P₂O₅ до 20 %. Комплексный минералого-геохимический подход позволил определить состав исходного пеплового материала, послужившего источником для формирования тонштейнов. Среди изученных прослоев преобладают тонштейны, образованные из кислой вулканогенной пирокластике, менее распространены тонштейны, образовавшиеся из вулканического пепла среднего состава. Редко встречаются тонштейны, сформированные при участии вулканогенного пирокластического материала основного и щелочно-основного составов. Исследования показали существенный вклад вулканогенного пирокластического материала в накопление PЗЭ, Zr, Hf, Ta, Nb, Y, Th и U в углях черногорской свиты Бейского месторождения. Рассмотрен вопрос о возможных источниках пеплового материала, из которого сформировались тонштейны.

Ключевые слова:

Уголь, тонштейны, геохимия, вулканогенная пирокластика, вулканический пепел.

Введение

Одним из основных факторов, контролирующих накопление редких элементов в углях, является фактор синхронного вулканизма [1]. Лишь в последнем десятилетии XX в. ученые по достоинству оценили глобальную роль вулканизма в формировании геохимического фона углей [2].

Участию вулканогенной пирокластике в формировании угленосных отложений Сибирского региона особое внимание уделял А.В. Ван [3, 4]. На примере Кузнецкого, Минусинского и Тунгусского бассейнов он показал тотальное значение вулканизма в формировании угленосных отложений [3]. Впервые присутствие вулканогенного пепла в углях Минусинского бассейна отмечено в работе В.М. Богомазова в 1961 г. [5].

Томские ученые обосновали связь аномальных концентраций PЗЭ, Zr, Y, Nb, Hf, Ta, Th в углях Минусинского бассейна с вулканогенным пирокластическим материалом [6].

Пирокластический материал в угле изменен и в большинстве случаев представлен в виде специфических прослоев, получивших в мировой геологической литературе название тонштейны. Они имеют преимущественно каолинитовый состав, большую протяженность и используются для корреляции угольных пластов в границах месторождений и бассейнов, а также для выяснения периодичности и состава продуктов вулканической деятельности [7]. И.Б. Волкова впервые для Минусинского угольного бассейна описала тонштейны, предположив их водно-осадочный генезис. Л.А. Адмакин изучил серию каолинитовых прослоев во вскрытых на тот момент угольных пластах (Гигант, Мощный, Великан) черногорской свиты. На основе исследования структурных и вещественных особенностей тонштейнов была проведена их типизация, рассмотрен гипотетический источник материала, а также предложены механизмы их накопления и стадийность преобразования [8].

В последнее десятилетие коллективом исследователей Томского политехнического университета была проделана работа по комплексному исследованию особенностей минерального и химического состава тонштейнов черногорской свиты Минусинского бассейна с целью выделения специфических по составу вулканогенных пепловых прослоев [9].

В основу данной работы положены как новые данные, так и обобщённые материалы, накопленные ранее. Целью исследования стало изучение минералого-геохимических особенностей тон-

штейнов и вмещающих их углей черногорской свиты Бейского месторождения Минусинского бассейна.

Геологическая характеристика района исследований

Минусинский угольный бассейн располагается на юге Центрально-Сибирского региона. В геологическом плане он приурочен к одноименному прогибу, представляющему синклиналичную структуру, вытянутую субмеридионально почти на 300 км и ограниченную с запада, востока и юга структурами

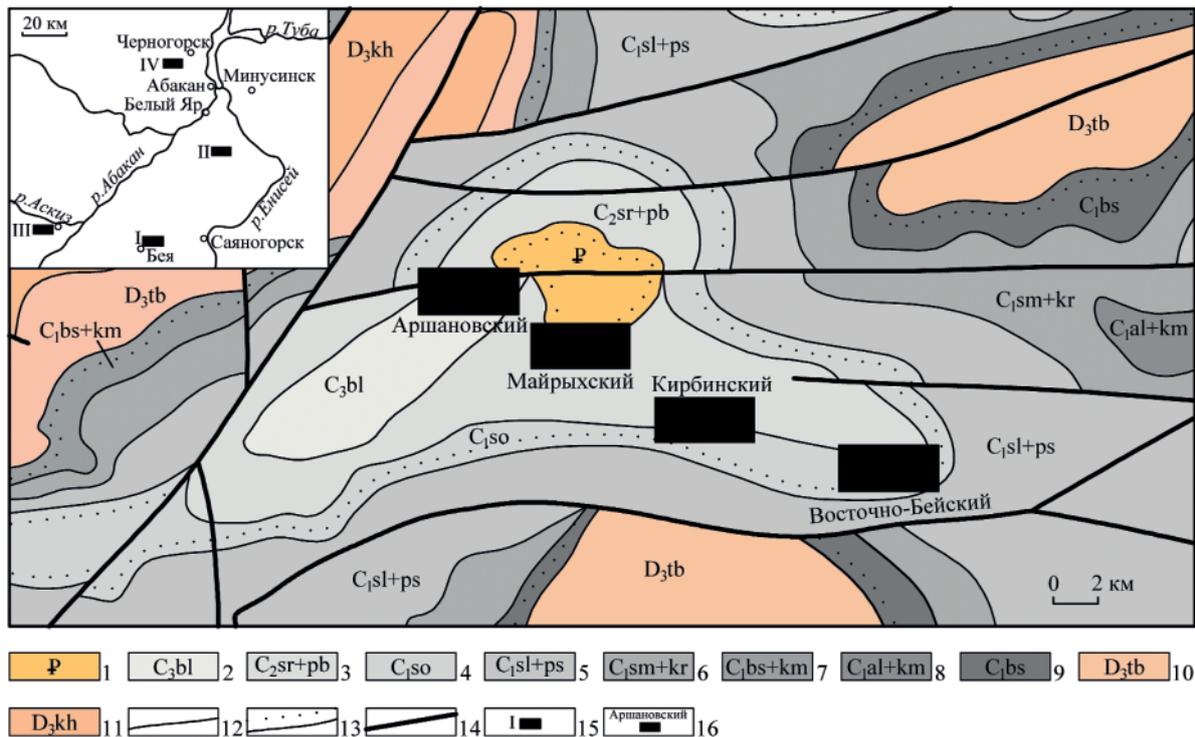


Рис. 1. Геологическая карта Бейского месторождения по [11]: 1 – палеогеновые образования; 2–9 – карбон: 2 – белоярская свита – алевролиты, аргиллиты, песчаники, пласты угля каменного (до 570 м), 3 – сарская, черногорская и побережная свиты объединенные – алевролиты, аргиллиты, песчаники, конгломераты, пласты угля каменного (до 720 м), 4 – серпуховский ярус (?). Солонозерская свита – песчаники, алевролиты, гравелиты, конгломераты (до 115 м), 5 – соломенская, ямкинская, байновская и подсинская свиты объединенные – туффиты, туфы, известняки, туфоалевролиты, туфопесчаники, конгломераты (до 700 м), 6 – самохвальская и кривинская свиты объединенные – туфы, туффиты, известняки, туфопесчаники, туфоалевролиты, конгломераты (до 380 м), 7 – быстрианская, алтайская и камыштинская свиты объединенные – туфы, туффиты, алевролиты, известняки, песчаники, конгломераты (до 470 м), 8 – алтайская и камыштинская свиты объединенные – алевролиты и известняки, туфы, туффиты, песчаники, гравелиты, конгломераты (до 250 м), 9 – быстрианская свита – туфы, туффиты, песчаники, известняки (до 220 м); 10–11 – девон: 10 – фаменский ярус. Тубинская свита – песчаники, алевролиты, аргиллиты, известняки, конгломераты, мергели (до 200–1300 м), 11 – франский ярус. Кохайская свита – алевролиты, песчаники, аргиллиты, мергели, туффиты (до 550 м); 12–13 – геологические границы: 12 – согласное залегание, 13 – несогласное залегание; 14 – разрывные нарушения; 15 – месторождения: I – Бейское, II – Изыхское, III – Аскизское, IV – Черногорское; 16 – разрезы, ведущие добычу угля на территории Бейского месторождения

Fig. 1. Geological map of the Beysk deposit by [11]: 1 – paleogene deposits; 2–9 – carbon: 2 – beloyarsk suite – siltstone, mudstone, sandstone, coal seams (up to 570 m), 3 – sarskaya, chernogorskaya and poberezhnaya combined suites – siltstone, mudstone, sandstone, conglomerate, coal seams (up to 720 m), 4 – serpukhovskiy epoch (?). Solenozerskaya suite – sandstone, siltstone, gravelite, conglomerate (up to 115 m), 5 – solomenskaya, yamkinskaya, baynovskaya and podsinskaya combined suites – tuffite, tuff, limestone, tuffsiltstone, tuffsandstone, conglomerate (up to 700 m), 6 – samokhvalskaya and krivinskaya combined suites – tuff, tuffite, limestone, tuffsandstone, tuffsiltstone, conglomerate (up to 380 m), 7 – bystryanskaya, altayskaya and kamyshinskaya combined suites – tuff, tuffite, siltstone, limestone, sandstone, gravelite, conglomerate (up to 470 m), 8 – altayskaya and kamyshinskaya combined suites – siltstone and limestone, tuff, tuffite, sandstone, gravelite, conglomerate (up to 250 m), 9 – bystryanskaya suite – tuff, tuffite, sandstone, limestone (up to 220 m); 10–11 – Devon: 10 – famenskiy epoch. Tubinskaya suite – sandstone, siltstone, mudstone, limestone, conglomerate, marl (up to 200–1300 m), 11 – franskiy epoch. Kokhaiskaya suite – siltstone, sandstone, mudstone, marl, tuffite (up to 550 m); 12–13 – contact lines: 12 – regular bedding, 13 – irregular bedding; 14 – faults; 15 – deposits: I – Beysk, II – Izykh, III – Askiz, IV – Chernogorsk; 16 – coal mines in the Beysk deposit

Кузнецкого Алатау, Восточного и Западного Саян. Продуктивная толща сложена нижнекаменноугольными – верхнепермскими отложениями. Основными промышленными месторождениями являются: Черногорское, Изыхское и Бейское (рис. 1) [10].

Строение угленосной толщи

Продуктивные отложения Бейского месторождения приурочены к одноименной мульде. Наибольшая глубина погружения угленосной толщи от 1300 до 1400 м. Доступный для исследования угленосный разрез с угольными пластами промышленной мощности представлен отложениями черногорской свиты.

Черногорская свита (C_2cr) подразделяется на две подсвиты с границей по кровле пачки песчаников, разделяющих угольные пласты 11 и 12. Свита представлена мелко- и тонкозернистыми песчаниками с тонкой слоистостью и алевритами, в нижней части разреза те и другие присутствуют почти в равных количествах, в верхней преобладают алевриты. Общая мощность черногорских отложений 260–290 м.

Продуктивная толща Бейского месторождения в целом содержит 40 угольных пластов мощностью 0,6–12 м и 22–25 угольных пропластков мощностью 0,05–0,6 м. Угольные пласты нумеруются снизу вверх. Промежуточные пласты, залегающие выше основного, индексируются номером основного пласта с дополнительной строчной буквой (19а), залегающие ниже – номером основного пласта со штрихом (16'). Нижняя граница черногорской свиты проводится по кровле пласта 6, верхняя – по кровле пласта 20 [10].

Положение тонштейнов в угольных пластах

Всего в угольных пластах Бейского месторождения черногорской свиты выявлено 42 тонштейна. Тонштейны без труда диагностируются в угольных пластах по светло-серому цвету. Контакты прослоев с углем резкие. Мощность тонштейнов варьирует от 0,2 до 4 см. В единичных случаях встречаются прослои до 9–10 см. Тонштейны часто группируются, образуя пачки с расстояниями между ними 70–100 см (рис. 2).

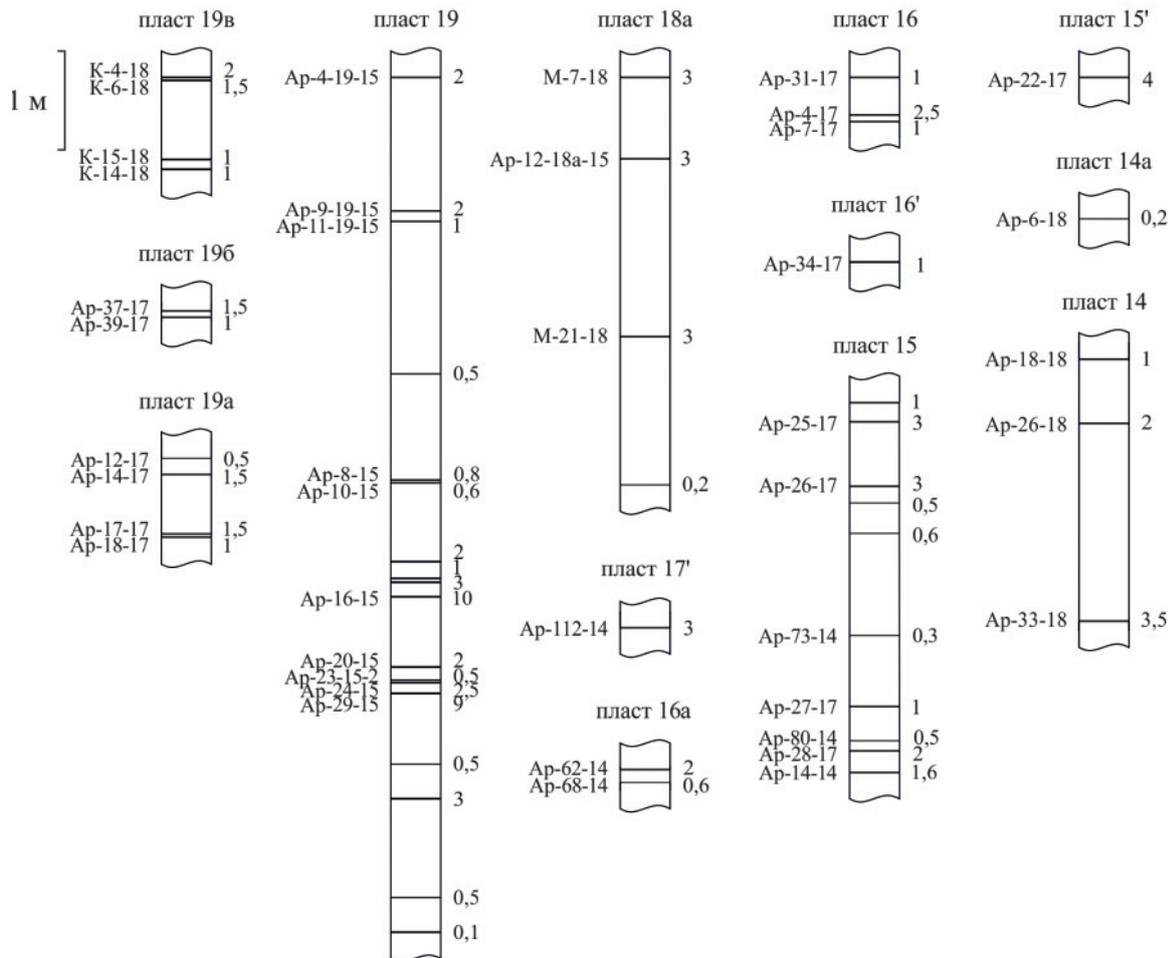


Рис. 2. Схема расположения тонштейнов в угольных пластах Бейского месторождения (мощность прослоев указана в см)

Fig. 2. Layout of tonsteins in the coal beds of the Beysk deposit (thickness of the interlayers is indicated in cm)

Методика исследований

Материалом для исследования послужили пробы тонштейнов и вмещающих их углей черноморской свиты Бейского месторождения Минусинского бассейна. Всего изучено 42 тонштейна мощностью от 0,2 до 10 см. Длина интервалов опробования изменялась от 1 до 5 см в зависимости от мощности опробованного тонштейна. Отдельные тонштейны опробованы в нескольких сечениях с целью проследить латеральную изменчивость минерального и химического состава.

Диагностика минерального состава тонштейнов проведена с помощью порошкового дифрактометра D2 PHASER. Изучение тонштейнов в шлифах позволило определить их структурно-текстурные особенности и наличие процессов замещения одних минералов другими. Формы, морфологические особенности и состав тонкодисперсных минеральных образований были изучены с использованием сканирующего электронного микроскопа HITACHI S-3400N с энергодисперсионной приставкой Bruker для определения элементного состава.

Элементный состав отобранных проб тонштейнов и вмещающих углей изучался с помощью методов инструментального нейтронно-активационного анализа (ИНАА) в ядерно-геохимической лаборатории Международного инновационного научно-образовательного центра (МИНОЦ) «Урановая геология» на базе исследовательского ядерного реактора ИРТ-Т НИ ТПУ (аналитик А.Ф. Судыко). А также спектрометрическим методом с индуктивно связанной плазмой (ICP MS) в аналитическом центре ДВГИ ДВО РАН, г. Владивосток (аналитик – Н.В. Зарубина) и в химико-аналитическом центре «Плазма», г. Томск (аналитик Н.В. Федюнина). Анализ состава петрогенных элементов тонштейнов и золы угля выполнен методом рентгеновской флуоресценции в лаборатории рентгеноспектральных методов анализа ИГМ СО РАН, г. Новосибирск (аналитик Н.Г. Карманова). Все лаборатории аккредитованы в системе аккредитации аналитических лабораторий Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии.

В табл. 1 показана сравнительная оценка результатов элементного анализа, полученного методом ICP MS, с результатами анализа методом INAA. Сходимость результатов удовлетворительная.

Таблица 1. Сравнение результатов определения содержания химических элементов методами ICP MS и INAA, ppm

Table 1. Comparison of the results of determination of chemical elements by ICP MS and INAA, ppm

Элементы Elements	Ap-37-17		Ap-4-17		Ap-29-17	
	ICP MS	INAA	ICP MS	INAA	ICP MS	INAA
Sc	8,2	9,5	13,6	14,3	10,6	9,7
Cr	20,7	16,0	8,1	20,6	4,1	8,7
Co	1,5	0,6	2,9	3,2	60,8	62,5
Zn	120,9	93,9	111	82,2	5,3	<2
Rb	2,3	1,0	2,9	<2	0,32	<3
Sr	2450	2311	4436	3739	775	603
Cs	0,22	0,10	0,14	<0,2	0,01	<0,2
Ba	419	540	1175	1228	256	226
La	102	147	97,0	121	34,1	34,6
Ce	209	255	208	224	44,6	45,0
Nd	88,1	90,9	89,2	81,8	16,7	<2
Sm	18,0	23,7	18,0	17,5	2,6	4,6
Eu	3,0	4,9	2,2	3,5	0,65	0,87
Tb	1,9	3,0	2,3	3,5	0,52	0,51
Yb	1,1	1,3	3,8	3,9	1,3	1,5
Lu	0,11	0,11	0,47	0,54	0,19	0,18
Hf	4,5	5,1	3,4	4,2	1,5	1,6
Ta	2,6	4,5	1,3	0,86	0,05	0,01
Th	101	117	87,0	74,9	1,0	1,3
U	10,7	10,0	18,2	14,6	2,4	2,8

Результаты исследований

Минеральный состав и структура

Изучение минерального состава тонштейнов Бейского месторождения показало, что каолинит является основным породообразующим минералом. Согласно ранее проведенным исследованиям по изучению преобразования вулканогенной пирро-

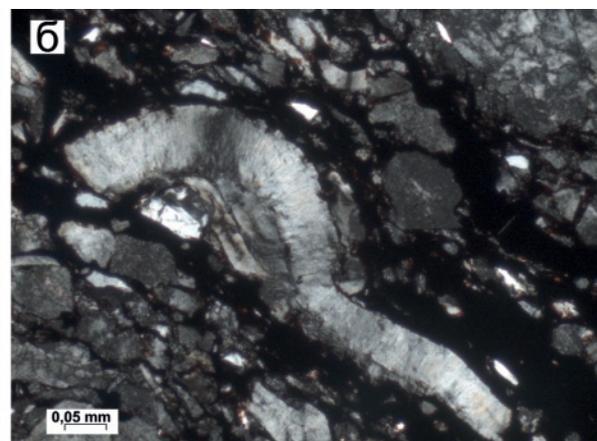
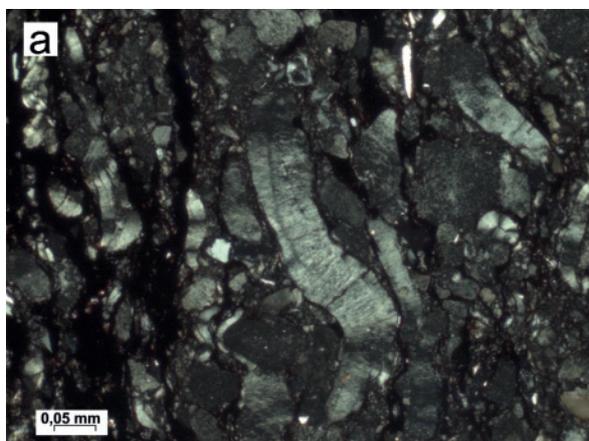


Рис. 3. Изогнутые агрегаты каолинита (вермикулы)

Fig. 3. Curved kaolinite aggregates (vermicula)

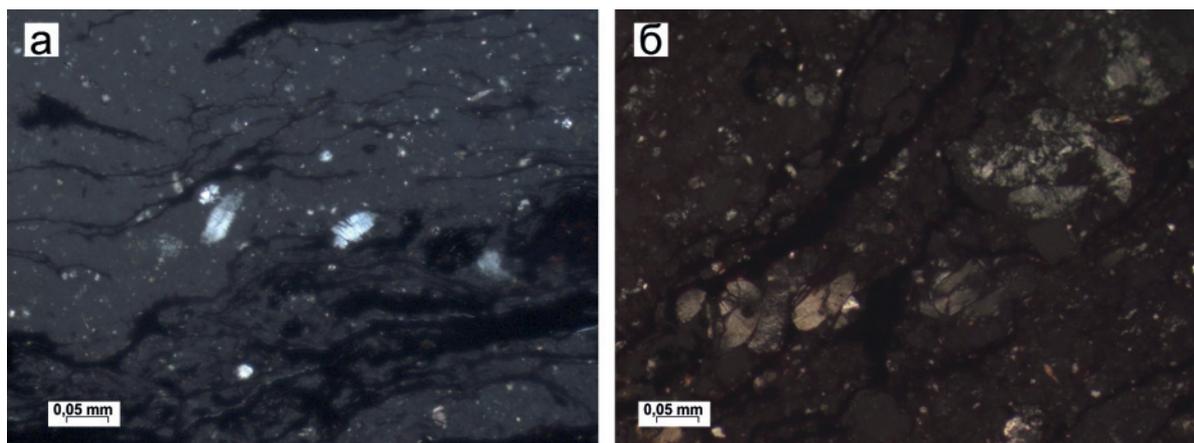


Рис. 4. Криптокристаллический (а) и крупчатый (б) тонштейны Бейского месторождения

Fig. 4. Cryptocrystalline (a) and granular (b) tonsteins of the Beysk deposit

кластики, каолинит образуется главным образом в процессе преобразования вулканического стекла и, в меньшей степени, полевых шпатов, амфиболов и пироксенов [12]. Характерной особенностью каолинита вулканокластических тонштейнов, отличающей их от породных каолиновых прослоев терригенной природы, является распространение в них хорошо образованных кристаллов (рис. 3). Хотя в составе тонштейнов широко распространена и тонкодисперсная разновидность каолинита, образующая так называемые криптокристаллические тонштейны (рис. 4, а) [8]. Среди тонштейнов Бейского месторождения диагностированы также крупчатые тонштейны, представленные неправильными комочками скрыто- и микрокристаллического каолинита (рис. 4, б).

Согласно рентгенофазовому анализу среди тонштейнов выделяются разновидности, обогащенные каолинитом (70–100 %), а также прослой смешанного состава (табл. 2).

К второстепенным минералам в составе тонштейнов относятся: кварц, кристобалит, тридимит, полевые шпаты, фторапатит, гойяцит, плюмбогуммит и отдельные акцессорные минералы (циркон, монацит, ксенотим и др.). Основными эпигенетическими минералами являются: сидерит, доломит, образовавшиеся в уже сформированных каолиновых прослоях. Такой минеральный состав в целом типичен для тонштейнов разных регионов мира [13–15].

Химический состав

В табл. 3 приведен химический состав тонштейнов Бейского месторождения. Как видно из результатов анализов, содержание кремнезема в тонштейнах колеблется в широких пределах – от 12,78 до 56,88 %. Содержание глинозема также изменяется в широком диапазоне (7,84–44,40 %). По данным показателям изученные тонштейны можно разделить на две группы. В первую группу входят тонштейны, близкие по составу к каолиниту, что выражается в обогащении кремнеземом (49,69–56,88 %) и глиноземом (39,59–44,40 %). Вторая группа

включает в себя тонштейны с малым содержанием SiO_2 (12,78–42,31 %) и Al_2O_3 (7,84–39,33 %). Эти тонштейны обычно обогащены Ca, Mg и Fe либо, в более редких случаях, фосфором.

Таблица 2. Минеральный состав тонштейнов Бейского месторождения

Table 2. Mineral composition of tonsteins of the Beysk deposit

Минерал Образец Mineral/Sample	Ap-37-17	Ap-39-17	Ap-12-17	Ap-14-17	Ap-17-17	Ap-18-17	Ap-8-15	Ap-62-14	Ap-68-14	Ap-4-17
Каолинит Kaolinite	90,4	88,5	89,4	85,5	86,7	80,8	69,5	33,0	64,6	72,6
Галлуазит Halloysite	3,1	2,6	–	–	–	–	7,3	–	–	–
Кварц Quartz	1,5	3,2	3,6	3,2	1,5	1,2	8,9	–	6,4	1,4
Кристобалит Cristobalite	–	–	1,4	1,5	2,0	2,6	8,9	–	–	2,2
Тридимит Tridymite	3,6	4,5	1,0	1,6	4,4	5,2	–	–	–	3,3
Мусковит Muscovite	–	–	1,5	1,0	1,4	2,1	–	–	–	1,1
Пирит Pyrite	–	–	–	1,0	–	1,0	–	–	–	–
Сидерит Siderite	–	–	–	–	–	–	–	–	1,5	13,5
Содалит Sodalite	–	–	–	1,0	1,0	1,7	–	–	–	–
Фторапатит Fluorapatite	–	–	–	–	–	–	–	16,3	–	–
Гойяцит Goyazite	–	–	–	–	–	–	–	45,7	27,5	3,1
Плюмбогуммит Plumbogummite	1,4	1,2	–	–	–	–	–	–	–	–
Доломит Dolomite	–	–	–	–	–	–	1,1	–	–	–
Ларнит Larnite	–	–	–	–	–	–	–	3,9	–	–
Плагиоклаз Plagioclase	–	–	–	1,0	–	–	–	–	–	–
КФШ K-feldspar	–	–	3,1	4,2	3,0	5,4	4,3	–	–	2,8
Хонолит Xonotlite	–	–	–	–	–	–	–	1,1	–	–
Сумма Sum, %	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Отношение SiO_2 к Al_2O_3 (алюмокремниевый модуль, АМ) для каолинита составляет 1,18. В исследуемых пробах это соотношение изменяется от 0,701 до 1,867. Пробы тонштейнов, которые отличаются низкой величиной АМ, во всех исследованных случаях характеризуются высоким содержанием P_2O_5 (0,94–16,99 %).

В основополагающей работе по обоснованию природы тонштейнов и их аналогов в углях Д.А. Спирс показал потерю SiO_2 , Na_2O и K_2O при преобразовании вулканического пепла в тонштейн на основе анализа включений вулканического стекла в кварце из одного и того же тонштейна. Потеря этих элементов увеличивает концентрацию Al в 2,95 раза. Также исследование показало, что в процессе преобразования TiO_2 не только не подвижен, но и сопоставим с первоначальной концентрацией в вулканическом пепле [16].

Значение титанового модуля ($\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, ТМ) позволяет оценить первичный состав вулканоген-

ной пирокластики, сформировавшей тонштейны. Исследования Д.А. Спирса и Р. Канариса-Сотириу показывают, что величина ТМ <0,02 характерна для риолитовой пирокластики, >0,06 – для основной. Промежуточные значения ТМ свидетельствуют о присутствии пирокластики среднего или щелочного состава [13].

Большинство исследованных тонштейнов Бейского месторождения характеризуются низким значением ТМ в диапазоне от 0,005 до 0,018, что соответствует пирокластике кислого состава. Остальные пробы, согласно ТМ (0,027–0,048), образовались из пеплов среднего или щелочного составов. Проба Ар-25–17 отличается высоким $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ отношением (0,077), свидетельствующим об основном составе пеплового материала.

В 1989 г. С. Кроули указал на то, что выщелачивание вулканического пепла вызвало увеличение содержания ряда элементов в угольных про- слоях, находящихся над и под тонштейном [17].

Таблица 3. Химический состав тонштейнов Бейского месторождения, вес. %

Table 3. Chemical composition of the tonsteins of Beysk deposit, wt. %

Компоненты Components	Ар-37-17	Ар-39-17	Ар-12-17	Ар-14-17	Ар-17-17	Ар-18-17	Ар-4-19-15	Ар-9-19-15	Ар-11-19-15	Ар-8-15	Ар-10-15	Ар-16-15	Ар-20-15	Ар-23-15-2	Ар-24-15
SiO_2	51,58	52,23	53,89	53,22	52,10	52,39	56,21	55,88	54,97	56,88	54,09	20,11	19,56	42,31	36,00
TiO_2	0,56	1,16	0,33	0,55	0,59	0,77	0,43	0,49	0,18	0,22	1,61	0,14	0,44	0,41	0,85
Al_2O_3	44,40	43,46	41,44	39,33	43,79	43,50	38,87	41,59	39,81	39,25	39,59	15,80	14,61	22,66	29,08
Fe_2O_3	0,74	0,77	1,54	2,82	1,51	1,50	1,91	0,31	2,47	0,97	2,26	4,89	62,62	3,22	6,71
MnO	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,04	1,19	0,03	0,05
MgO	0,17	0,18	1,40	1,16	0,34	0,27	0,18	0,18	0,37	0,16	0,32	20,28	0,64	8,02	6,35
CaO	0,33	0,37	0,28	0,89	0,34	0,38	0,25	0,25	0,44	0,23	0,38	35,27	0,68	13,94	11,34
Na_2O	0,08	0,14	0,10	0,20	0,10	0,12	0,21	0,06	0,17	0,21	0,13	0,09	0,15	0,28	0,13
K_2O	0,10	0,17	0,25	0,38	0,11	0,12	1,19	0,28	0,60	1,15	0,49	0,12	0,25	0,89	0,24
P_2O_5	0,94	0,63	0,11	0,58	0,34	0,10	0,04	0,04	0,07	0,08	0,10	0,07	0,11	0,20	0,08
BaO	0,08	0,06	0,02	0,05	0,04	0,02	0,08	0,01	0,02	0,08	0,06	0,03	0,04	0,04	0,04
LOI	19,69	22,26	23,27	29,68	35,35	53,42	36,41	18,32	17,83	22,05	46,60	57,29	32,44	52,12	30,36
Сумма/Σ	99,00	99,18	99,39	99,20	99,29	99,20	99,39	99,11	99,12	99,24	99,04	96,83	100,28	92,01	90,87
$\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	0,013	0,027	0,008	0,014	0,013	0,018	0,011	0,012	0,005	0,006	0,041	0,009	0,030	0,018	0,029
$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	1,16	1,20	1,30	1,35	1,19	1,20	1,45	1,34	1,38	1,45	1,37	1,27	1,34	1,87	1,24
Компоненты Components	Ар-29-15	Ар-12-18а-15	Ар-62-14	Ар-68-14	Ар-31-17	Ар-4-17	Ар-7-17	Ар-34-17	Ар-25-17	Ар-26-17	Ар-27-17	Ар-80-14	Ар-28-17	Ар-14-14	Ар-22-17
SiO_2	12,78	35,81	26,64	39,10	53,69	41,29	52,68	34,59	51,77	49,69	51,80	53,65	51,35	52,58	52,33
TiO_2	0,10	1,26	0,27	0,25	0,28	0,42	0,20	0,23	3,28	1,38	0,52	0,30	2,02	1,19	1,72
Al_2O_3	7,84	28,96	37,98	41,51	41,96	35,14	39,09	32,71	42,49	40,10	39,62	43,27	41,74	42,95	42,40
Fe_2O_3	3,12	21,92	1,75	1,28	1,93	13,08	3,80	15,09	0,53	6,78	6,36	0,84	3,38	1,14	1,22
MnO	0,02	0,30	0,02	0,01	0,01	0,13	0,04	0,10	0,01	0,03	0,03	0,01	0,02	0,01	0,01
MgO	27,84	6,95	0,19	0,20	0,20	6,18	2,35	2,36	0,23	0,43	0,18	0,22	0,26	0,40	0,24
CaO	43,71	2,48	5,90	1,43	0,16	0,99	0,32	1,85	0,33	0,33	0,13	0,33	0,37	0,63	0,23
Na_2O	0,13	0,14	0,26	0,17	0,14	0,15	0,20	0,35	0,11	0,11	0,10	0,08	0,19	0,06	0,11
K_2O	0,24	0,39	0,10	0,15	0,27	0,15	0,29	0,40	0,20	0,25	0,22	0,24	0,28	0,16	0,49
P_2O_5	0,06	0,85	16,99	9,06	0,30	1,48	0,14	8,01	0,17	0,13	0,04	0,09	0,08	0,09	0,19
BaO	0,03	0,05	2,77	2,31	0,10	0,22	0,04	1,48	0,07	0,05	0,02	0,01	0,06	0,03	0,05
LOI	70,50	30,12	23,07	27,39	18,89	25,33	23,46	38,50	25,90	27,08	22,78	79,98	33,36	29,37	21,94
Сумма/Σ	95,88	99,11	92,86	95,47	99,05	99,23	99,15	97,17	99,19	99,28	99,03	99,04	99,75	99,24	98,99
$\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	0,013	0,044	0,007	0,006	0,007	0,012	0,005	0,007	0,077	0,034	0,013	0,007	0,048	0,028	0,041
$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	1,63	1,24	0,70	0,94	1,28	1,18	1,35	1,06	1,22	1,24	1,31	1,24	1,23	1,22	1,23

Тонштейны Бейского месторождения, различающиеся по содержанию основных породообразующих окислов, отличаются и по содержанию микроэлементов (табл. 4). В целом для месторождения в изученных образцах отмечено повышен-

ное относительно среднего состава глинистых сланцев содержание РЗЭ, Zn, Ga, Sr, Y, Zr, Sn, Ba, Pb, Th и U. Основная вероятная причина разнообразия микроэлементного состава тонштейнов заключается в различном составе исходной вулкано-

Таблица 4. Содержание химических элементов в тонштейнах Бейского месторождения, ppm

Table 4. Content of chemical elements in tonsteins of Beysk deposit, ppm

Элементы Elements	Кларк, глины ¹ Calrk, clays ¹	риолит rhyolite		риодацит rhyodacite			андезит andesite		базальт basalt	щелочные alkaline		
		Ap-18-17	Ap-8-15	Ap-37-17	Ap-12-17	Ap-31-17	Ap-12-18a-15	Ap-14-14	Ap-25-17	Ap-26-17	Ap-22-17	Ap-28-17
Be	2,8	2,3	0,69	2,2	1,5	0,79	1,4	0,48	1,0	0,64	1,5	0,58
Sc	15,0	5,0	12,8	10,2	10,9	13,3	8,1	4,2	17,7	6,7	8,0	6,5
V	120	12,1	–	18,0	27,8	7,8	–	11,5	37,4	8,4	19,0	12,3
Cr	76,0	10,5	0,6	25,6	22,5	27,2	9,1	6,1	26,7	25,8	28,3	30,5
Co	19,0	5,6	0,28	1,9	6,4	6,1	25,5	1,9	8,4	0,58	3,2	1,4
Ni	47,0	21,9	3,2	10,9	20,3	17,1	183	8,4	9,0	6,0	12,0	8,3
Cu	36,0	16,9	6,4	37,6	28,0	26,9	19,9	28,0	49,5	27,5	22,7	43,5
Zn	52,0	15,4	11,0	150	24,2	208	161	30,6	94,8	163	83,6	151
Ga	16,0	48,6	45,9	51,7	43,3	37,4	28,7	29,8	40,1	37,1	40,8	37,6
As	9	14,1	2,5	1,2	2,0	24,8	226	0,3	2,5	2,5	1,3	1,3
Rb	130	2,6	21,0	2,9	5,6	8,7	12,3	3,2	4,5	5,6	9,9	5,6
Sr	240	198	97	3038	69	1071	187	132	158	263	499	120
Y	31,0	37,8	9,8	25,6	29,1	37,9	48,4	23,7	16,2	32,7	11,2	17,9
Zr	190	279	233	163	145	129	89,0	52,7	141	148	374	117
Nb	11,0	11,6	1,0	9,6	3,8	2,1	7,4	5,8	10,8	16,5	36,4	16,4
Mo	1,6	3,3	0,01	–	1,4	–	2,9	1,5	–	–	–	–
Cd	1,0	0,23	0,26	0,57	0,20	0,81	1,25	1,51	0,59	2,02	0,63	1,19
Sn	3,5	7,7	1,9	5,3	6,5	4,5	1,8	2,7	4,3	5,0	6,5	4,9
Sb	1,0	0,84	0,11	0,81	1,08	0,57	0,41	0,24	0,64	0,66	1,06	0,71
Cs	10,0	0,12	0,20	0,27	0,43	1,30	0,41	0,38	0,63	0,94	0,77	0,30
Ba	460	180	612	520	122	817	694	158	527	334	285	394
La	48,0	104	19,8	126	72,7	60,0	110	80,0	18,1	64,0	97,3	68,8
Ce	75,0	238	44,9	259	163	141	244	172	42,4	171	232	142
Pr	10,0	26,4	4,8	29,3	18,2	14,9	28,3	19,6	5,4	21,4	24,4	16,7
Nd	36,0	90,1	17,7	109	69,8	55,8	103	77,5	23,7	82,7	86,2	64,6
Sm	8,0	17,7	2,9	22,3	12,1	12,0	18,9	13,2	4,1	18,0	13,4	10,9
Eu	1,2	2,0	0,54	3,7	1,9	2,5	4,3	2,7	1,1	2,9	1,8	2,0
Gd	5,8	14,3	2,5	22,0	9,9	11,5	16,6	11,1	4,0	13,6	8,3	8,3
Tb	0,80	1,9	0,38	2,4	1,4	1,5	1,9	1,2	0,61	1,6	0,99	0,99
Dy	4,4	10,7	2,2	10,8	7,6	8,3	8,5	6,8	3,6	9,0	5,0	4,9
Ho	0,70	1,53	0,41	1,42	1,21	1,39	1,53	1,1	0,69	1,48	0,97	0,81
Er	1,90	4,07	1,19	2,8	3,62	3,9	4,7	3,2	2,4	4,5	2,6	2,4
Tm	0,60	0,51	0,18	0,23	0,44	0,48	0,66	0,38	0,30	0,57	0,37	0,32
Yb	2,50	3,3	1,3	1,3	3,0	3,5	4,0	2,5	2,0	3,8	2,3	2,2
Lu	0,40	0,40	0,17	0,14	0,40	0,41	0,58	0,33	0,31	0,55	0,31	0,30
Hf	5,0	10,6	5,1	5,6	5,4	3,7	2,5	2,7	3,8	5,2	10,5	3,8
Ta	1,4	3,2	0,68	3,2	0,92	0,86	1,0	0,97	0,96	2,4	4,1	1,9
W	2,6	0,57	0,37	3,1	0,68	2,7	4,0	1,5	3,6	4,2	5,2	4,8
Au	0,0065	0,040	<0,002	0,0076	0,0047	0,051	0,024	0,0005	0,0018	0,025	0,0067	0,0019
Hg	0,089	0,27	0,032	0,25	0,26	0,33	0,075	0,076	0,093	0,22	0,096	0,19
Pb	14,0	59,0	40,5	82,6	46,0	74,4	13,7	33,7	44,7	54,2	80,6	74,1
Th	10,0	130	19,7	145	92,0	93,8	17,0	13,7	8,8	27,0	52,8	25,0
U	4,5	24,4	6,0	12,4	13,4	9,9	53,3	10,9	6,7	16,2	36,8	11,6

Примечание: – нет данных; 1 – по [18].

Notes: – no data; 1 – by [18].

генной пирокластике. В табл. 4 в качестве примера приведены содержания химических элементов в основных типах тонштейнов черногорской свиты Бейского месторождения. Показаны группы тонштейнов, образовавшихся из пирокластике различного состава: от риолитов до базальтоидов.

Обсуждение результатов

Близкий минеральный состав большинства изученных тонштейнов, обусловленный преобразованием исходного материала в достаточно агрессивной, богатой органическими кислотами среде торфяного болота, осложняет диагностику первичного их состава. Как правило, тонштейны в основной массе представлены каолинитом с небольшим количеством других минеральных фаз. Реликтовые структуры и типы псевдоморфных минералов, диагностируемые в тонштейнах, являются показателем того, что изученные тонштейны сформировались из пеплового материала, поступившего в палеоторфяник [19]. Однако минеральный состав тонштейнов не позволяет реставрировать исходный состав пеплового материала из-за практически полного преобразования в агрессивной среде торфяного болота.

Диаграмма – сумма щелочей-кремнезем (TAS), используемая для химической классификации вулканических горных пород, не применима к тонштейнам, из-за потери SiO_2 , Na_2O и K_2O при преобразовании вулканического пепла в тонштейн. Для идентификации первичного состава вулканогенной пирокластике традиционно используются химические элементы малоподвижные в зоне гипергенеза. К этой группе элементов относятся Al, Ti, Zr, Y, Nb [9, 13, 20].

На отношении Zr/Ti к Nb/Y , входящих в группу инертных элементов, основана классификационная диаграмма Дж.А. Винчестера и Р.А. Флойда [21]. Согласно классификационной диаграмме (рис. 5), тонштейны Бейского месторождения образовались из вулканогенной пирокластике преимущественно риодацитового и андезитового составов. При использовании классификационной диа-

граммы следует учитывать более значительный вынос циркония из пепловых горизонтов по сравнению с титаном в процессе разложения первичного минерального вещества. Данный вывод основан на выявленных фактах повсеместного, иногда весьма значительного накопления циркония в углях, находящихся вблизи тонштейнов в непосредственном контакте с ними [1, 22, 23]. Он подтвержден также многочисленными находками корродированных кристаллов циркона в тонштейнах (рис. 6) [9].

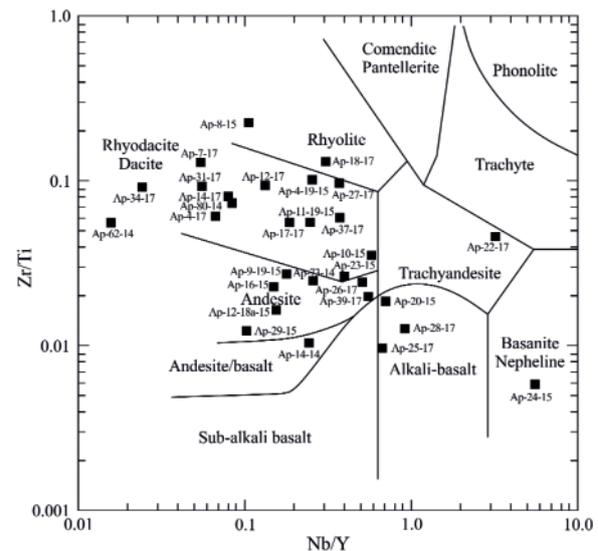


Рис. 5. Классификационная диаграмма тонштейнов Бейского месторождения [21]

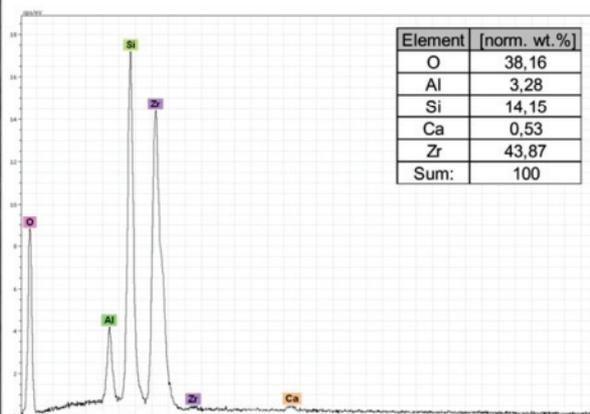
Fig. 5. Discriminant diagram of tonsteins of the Beysk deposit [21]

Основной трудностью в диагностике исходного состава вулканогенной пирокластике является перераспределение вещества при преобразовании пеплового материала в палеоболотной среде. В связи с этим в угле, находящемся в угольном пласте как выше, так и ниже тонштейна, наблюдаются специфические геохимические ассоциации, обусловленные особенностями состава первичной вулканогенной пирокластике.



Рис. 6. Корродированный кристалл циркона в тонштейне

Fig. 6. Corroded zircon crystal in tonstein



В пласте 16 обнаружено три тонштейна (Ар-31–17, Ар-4–17, Ар-7–17), сформировавшихся из вулканогенной пирокластической кислого состава. В золах углей, находящихся на контакте с тонштейном и на незначительном удалении (1–5 см) от них, отмечаются контрастные аномалии РЗЭ – 0,38 %, Zr – 0,57 %, Hf – 167 г/т, Ta – 57 г/т, Nb – 416 г/т, Y – 450 г/т, Th – 290 г/т. Эти данные согласуются с выводами о редкометаллической Nb-Ta-Zr-Y-Th-редкоземельной специализации углей Минусинского бассейна, обусловленной вулканогенной природой ее формирования, связанной с пирокластикой преимущественно кислого состава [1].

Все эти данные свидетельствуют, что для достоверной диагностики состава первичного вулканогенного пирокластического материала, сформировавшегося тонштейны, необходимо использовать комплексный подход. Так, при совмещении ТМ (TiO_2/Al_2O_3) и классификационной диаграммы (Zr/Ti к Nb/Y) возможна реставрация первоначального состава пеплов.

Важным критерием для диагностики первичного состава тонштейнов является их геохимическая специализация, выраженная в избыточном накоплении определенных групп химических элементов как в самих тонштейнах, так и в углях на контакте с ними. В первую очередь это элементы-гидролизаты. Для кислых и щелочных пород характерно накопление Zr, Hf, Ta, Nb, РЗЭ, Y, реже Ga, Sn, Sr, Be и других литофильных элементов. Для базитов характерно накопление элементов-сидерфилов.

В качестве дополнительного критерия можно использовать Th, позволяющий отчетливо разделять пирокластическую кислого и основного состава. Для вулканогенной пирокластической кислого и щелочного составов характерно высокое содержание Th (13,5–145,2 г/т). Для разностей среднего и основного составов характерны более низкие содержания тория, вплоть до 0,8 г/т.

Проведенные минералого-геохимические исследования показали, что в целом в изученном разрезе преобладала вулканогенная пирокластическая кислого состава (риолиты, риодациты). При этом в пласте 15' вулканогенная пирокластическая представлена разностями щелочного состава. Выше по разрезу состав пеплового материала изменяется до риодацитового (пласт 15). Залегающие выше пласты 16', 16, 16а вмещают прослои измененной пирокластической кислого состава. Еще выше по разрезу, в пластах 17' и 18а, обнаружены тонштейны, образованные из вулканогенных пеплов риодацитового состава. Самые верхние пласты этой части угленосного разреза 19, 19а, 19б также содержат пирокластическую преимущественно кислого состава.

Источник вулканогенного пеплового материала в углях Минусинского бассейна достоверно не установлен. Существует несколько точек зрения на эту проблему. По мнению В.М. Богомазова, в период угленакопления источник вулканических извержений располагался на западе и северо-запа-

де Алтае-Саянской складчатой области [5]. Л.А. Адмакин предполагал, что источник мог находиться на территории современного Западного Саяна [7]. Согласно еще одной точке зрения, источник пеплового материала располагался на юге Монголии, в Обь-Иртышской зоне смятия [24].

Очевидно, что с приближением к источнику мощность отложений вулканогенного пирокластического материала будет увеличиваться. На северо-западе Монголии в позднекарбоновых углях месторождения Нурст Хотгор диагностируются тонштейны мощностью до 30 см [9], что говорит о близком расположении источника вулканогенного материала к этому угольному месторождению, нежели к Бейскому месторождению Минусинского бассейна. Малые мощности выявленных вулканогенных прослоев не исключают участия вулканитов этого региона в формировании тонштейнов Бейского месторождения. Однако критериев, позволяющих надежно привязать эти измененные пепловые породы к тому или иному конкретному источнику вулканизма, пока не выделено.

Заключение

Тонштейны Бейского месторождения имеют отличительные минералогические и геохимические особенности, которые позволяют идентифицировать их как преобразованную вулканогенную пирокластическую. В их составе преобладает каолинит. Менее распространены кварц, кристобалит, тридимит, фосфаты, полевые шпаты и отдельные акцессорные минералы (циркон, монацит, ксенотим). Встречаются сидерит и доломит.

Комплекс методов позволил определить состав исходного пеплового материала, послужившего источником для формирования тонштейнов. Среди изученных тонштейнов преобладают продукты преобразования кислой пирокластической преимущественно риолитового и риодацитового состава. Менее распространены тонштейны – производные пеплов среднего состава, и исключительно редко встречаются тонштейны, образованные из пеплов основного и щелочно-основного состава.

По химическому составу преобладают тонштейны, близкие к составу каолинита. Реже встречаются фосфатные тонштейны с содержанием P_2O_5 до 16,99 %. Редко встречаются тонштейны, обогащенные эпигенетическими карбонатами, с повышенным содержанием Ca, Mg и Fe. Исследования показали, что с вулканогенным пирокластическим материалом в углях черногорской свиты Бейского месторождения связаны контрастные аномалии РЗЭ, Zr, Hf, Ta, Nb, Y и Th.

Существует проблема нахождения источника вулканогенной пирокластической, из которой сформировались тонштейны. Выяснение месторасположения источника позволит проследить закономерность в динамике изменения состава пирокластической.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-17-00004).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арбузов С.И., Ершов В.В. Геохимия редких элементов в углях Сибири. – Томск: ИД «Д-Принт», 2007. – 468 с.
2. Finkelman R.B. Trace and minor elements in coal // *Organic geochemistry* / Eds. M.H. Engel, S. Masco. – New York: Plenum, 1993. – P. 593–607.
3. Ван А.В. Вулканоогенный пепел в угленосных отложениях верхнего палеозоя Средней Сибири // *Литология и полезные ископаемые*. – 1972. – № 1. – С. 40–51.
4. Ван А.В. Вулканизм и угленакопление // *Вопросы литологии Сибири. Труды Сибирского научно-исследовательского института геологии, геофизики и минерального сырья*. – Новосибирск, 1973. – Вып. 170. – С. 14–21.
5. 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 Академии наук СССР, 1961. – С. 79–116.
6. Редкометалльный потенциал углей Минусинского бассейна / С.И. Арбузов, В.В. Ершов, Л.П. Рихванов, Т.Ю. Усова, В.В. Кяргин, А.А. Булатов, Н.Е. Дубовик. – Новосибирск: Изд-во Сибирского отделения Российской академии наук, филиал «Гео», 2003. – 347 с.
7. Адмакин Л.А. Тонштейны – геохронометры древних эруптивных циклов // *Доклады Академии наук СССР*. – 1991. – Т. 320. – № 5. – С. 1194–1197.
8. Адмакин Л.А. Типы тонштейнов в угольных пластах Минусинского бассейна // *Литология и полезные ископаемые*. – 1992. – № 2. – С. 49–56.
9. Минералого-геохимическая идентификация продуктов эксплозивного вулканизма в углях Минусинского бассейна / С.И. Арбузов, С.С. Ильенок, А.В. Вергунов, М.В. Шалдыбин, В.М. Соболенко, П.Е. Некрасов // *Петрология магматических и метаморфических комплексов*. Вып. 9 Материалы IX Всероссийской петрографической конференции с международным участием. – Томск: Изд-во Томского центра научно-технической информации, 2017. – С. 35–37.
10. Угольная база России. Т. 3. Угольные бассейны и месторождения Восточной Сибири. – М.: ООО «Геоинформцентр», 2002. – 488 с.
11. Государственная геологическая карта РФ. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Алтай-Саянская. Лист N-46 – Абакан. – СПб.: Картфабрика Всероссийского научно-исследовательского геологического института, 2008.
12. Bohor V.F., Triplehorn D.M. Tonsteins: Altered Volcanic Ash Layers in Coal-bearing Sequences // *Geological Society of America*. – 1993. – V. 285 (Special Paper). – P. 42.
13. Altered volcanic ashes in coal and coal-bearing sequences: a review of their nature and significance / S. Dai, C.R. Ward, I.T. Graham, D. French, J.C. Hower, L. Zhao, X. Wang // *Earth-Science Reviews*. – 2017. – V. 175. – P. 44–74.
14. Erkoyuna H., Kadira S., Huggett J. Occurrence and genesis of tonsteins in the Miocene lignite, Tunçbilek Basin, Kütahya, western Turkey // *Int. J. of Coal Geol.* – 2019. – V. 202. – P. 46–68.
15. Rare earth element and yttrium content of coal in the Banko coalfield, South Sumatra Basin, Indonesia: Contributions from tonstein layers / F. Anggara, D.H. Amijaya, A. Harijoko, T.N. Tambaria, A.A. Sahri, Z.A. Nur Asa // *Int. J. of Coal Geol.* – 2018. – V. 196. – P. 159–172.
16. Spears D.A. The origin of tonsteins, an overview, and links with seatearths, fireclays and fragmental clay rocks // *Int. J. of Coal Geol.* – 2012. – V. 94. – P. 22–31.
17. Crowley S.S., Stanton R.W., Ryer T.A. The effects of volcanic ash on the maceral and chemical composition of the C coal bed, Emery Coal Field, Utah // *Org. Geochem.* – 1989. – V. 14. – P. 315–331.
18. Grigorev N.A. Average concentrations of chemical elements in rocks of the upper continental crust // *Geochemistry International*. – 2003. – V. 41. – № 7. – P. 711–718.
19. Адмакин Л.А. Классификация и номенклатура тонштейнов // *Литология и полезные ископаемые*. – 1995. – № 6. – С. 643–653.
20. Burger K., Zhou Y., Ren Y. Petrography and geochemistry of tonsteins from the 4th Member of the Upper Triassic Xujiahe formation in southern Sichuan Province, China // *Int. J. Coal Geol.* – 2002. – V. 49. – P. 1–17.
21. Winchester J.A., Floyd P.A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements // *Chemical Geology*. – 1977. – V. 20. – P. 325–343.
22. Hower J.C., Ruppert L.F., Eble C.F. Lanthanide, yttrium, and zirconium anomalies in the Fire Clay coal bed, Eastern Kentucky // *Int. J. Coal Geology*. – 1999. – V. 39. – P. 141–153.
23. Nature of Tonsteins in the Azeisk Deposit of the Irkutsk Coal Basin (Siberia, Russia) / S.I. Arbuзов, A.M. Mezhibor, D.A. Spears, S.S. Ilenok, M.V. Shaldybin, E.V. Belaya // *International Journal of Coal Geology*. – 2016. – V. 152. – P. 99–111.
24. Зотова Е.А. Государственная геологическая карта РФ. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Алтай-Саянская. Лист N-46 – Абакан. Объяснительная записка / под ред. Е.А. Зотовой. – СПб.: Картфабрика Всероссийского научно-исследовательского геологического института, 2008. – 399 с.

Поступила 30.01.2019 г.

Информация об авторах

Вергунов А.В., аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Арбузов С.И., доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Соболенко В.М., главный геолог ОАО «Разрез Аршановский».

UDC 552.57, 552.52

MINERALOGY AND GEOCHEMISTRY OF TONSTEINS IN THE BEYSK COAL DEPOSIT OF THE MINUSINSK COAL BASIN

Alexey V. Vergunov¹,
alexeivergunov@rambler.ru

Sergey I. Arbuzov¹,
siarbuzov@mail.ru

Victor M. Sobolenko²,
v.sobolenko@arshanovskiy.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

² JSC «Arshanovsky Coal Mine»,
20, Lermontov street, Abakan, 655016, Russia.

The relevance of the research is determined by the necessity for assessment of volcanic pyroclastic material impact on formation of geochemical background of rare elements in coal.

The main aim is to study the mineralogical and geochemical features of tonsteins and enclosing coals of chernogorskaya suite in the Beysk coal deposit (Minusinsk coal basin).

Objects of the research are tonsteins and enclosing coals of chernogorskaya suite in the Beysk coal deposit (Minusinsk coal basin).

Methods: sampling of coal seams of chernogorskaya suite in the Beysk coal deposit; chemical composition is estimated with inductively coupled plasma mass-spectrometry, instrumental neutron activation analysis, x-ray fluorescence methods; mineral composition is defined with optical microscopy, petrographic analysis, scanning electron microscopy, x-ray diffractometry.

Results. The paper studies mineralogical and geochemical characteristics of the tonsteins in chernogorskaya suite of the Beysk coal deposit (Minusinsk coal basin). Tonsteins of the Beysk deposit are divided into two types: 1. tonsteins of kaolinite (70–100 %) composition, 2. tonsteins of mixed composition. Few kaolinite seams contain P_2O_5 up to 20 %. Integrated mineral and geochemical analysis allow determining the composition of the initial ash material, which served as a source for formation of tonsteins. Tonsteins formed from felsic volcanogenic pyroclastics are predominant; tonsteins of intermediate volcanic ash are less widespread. Tonsteins formed from mafic and alkaline-base volcanic material are rare. Investigations show that volcanogenic pyroclastics played a significant role in accumulation of rare-earth elements, Zr, Hf, Ta, Nb, Y, Th, and U in coals of chernogorskaya suite in the Beysk coal deposit. We also discussed possible sources of ashes that formed the tonsteins.

Key words:

Coal, tonsteins, geochemistry, volcanogenic pyroclastics, volcanic ash.

The research was carried out under the support of the grant of Russian Science Foundation (Project no. 18–17–00004).

REFERENCES

- Arbuzov S.I., Ershov V.V. *Geokhimiya redkikh elementov v uglyakh Sibiri* [Geochemistry of rare elements in coals of Siberia]. Tomsk, D-Print Publ. house, 2007. 468 p.
- Finkelman R.B. Trace and minor elements in coal. *Organic Geochemistry*. Eds. M.H. Engel, S. Macko. New York, Plenum, 1993. pp. 593–607.
- Van A.V. Vulkanogenny pepel v ugleunosnykh otlozheniyakh verkhnego paleozoya Sredney Sibiri [Volcanogenic ash in coal-bearing sediments of the Upper Paleozoic of Middle Siberia]. *Lithology and mineral*, 1972, no. 1, pp. 40–51.
- Van A.V. Vulkanizm i uglenakopleniye [Volcanism and coal accumulation]. *Voprosy litologii Sibiri. Trudy Sibirskogo nauchno-sledovatel'skogo instituta geologii, geofiziki i mineralnogo syr'ya* [Issues of lithology of Siberia. Proc. of Siberian research institute of geology, geophysics and mineral raw materials]. Novosibirsk, 1973. Vol. 170, pp. 14–21.
- Bogomazov V.M. Stratigrafiya i usloviya obrazovaniya dougleunosnykh i ugleunosnykh otlozheniy karbona i permi Minusinskogo basseyna [Stratigraphy and conditions for formation of pre-carboniferous and coal-bearing carbon and Permian deposits of the Minusinsk basin]. *Voprosy geologii ugleunosnykh otlozheniy aziatskoy chasti SSSR* [Geology of coal-bearing sediments in the Asian part of the USSR]. Moscow, Leningrad, Academy of Sciences of the USSR Publ., 1961. pp. 79–116.
- Arbuzov S.I., Ershov V.V., Rikhvanov L.P., Usova T.Yu., Kyargin V.V., Bulatov A.A., Dubovik N.E. *Redkometalnyy potentsial ugley Minusinskogo basseyna* [Raremetal potential of the Minusinsk coal basin]. Novosibirsk, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Press, 2003. 347 p.
- Admakin L.A. Tonshteyny – geokhronometry drevnykh eruptivnykh tsiklov [Tonsteins as Geochronometers of Ancient Eruptive Cycles]. *Doklady Akademii nauk SSSR*, 1991, vol. 320, no. 5, pp. 1194–1197.
- Admakin L.A. Tipy tonshteynov v ugolnykh plastakh Minusinskogo basseyna [Types of tonsteins in coal beds of the Minusinsk basin]. *Lithology and minerals*, 1992, no. 2, pp. 49–56.
- Arbuzov S.I., Ilenok S.S., Vergunov A.V., Shaldybin M.V., Sobolenko V.M., Nekrasov P.E. Mineralogo-geokhimicheskaya identifikatsiya produktov eksplozivnogo vulkanizma v uglyakh Minusinskogo basseyna [Mineralogical and geochemical identification of products of explosive volcanism in the coals of the Minusinsk basin]. *Petrologiya magmaticheskikh i metamorficheskikh kompleksov. Vyp. 9 Materialy IX Vserossiyskoy petrograficheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem* [Petrology of magmatic and metamorphic complexes. Iss. 9 Materials of the IX All-Russian

- an Petrographic Conference with international participation]. Tomsk, Tomsk scientific and technical information center Publ. 2017. pp. 35–37.
10. *Ugolnaya baza Rossii. T. 3. Ugolnye basseyny i mestorozhdeniya Vostochnoy Sibiri* [Coal base of Russia. Vol. III. Coal basins and deposits of Eastern Siberia]. Moscow, Geoinformtsentr Publ., 2002. 488 p.
 11. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta RF. Masshtab 1:1000000 (tretye pokoleniye). Seriya Altaye-Sayanskaya. List N-46, Abakan* [State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1000000 (third generation). Series Altai-Sayan. Sheet N-46, Abakan]. St-Petersburg, Cartridge factory Russian Geological Research Institute, 2008.
 12. Bohor B.F. Tonsteins: Altered Volcanic-Ash Layers in Coal-Bearing Sequences. *Geological Society of America*, 1993, vol. 285 Spec. Paper, pp. 42.
 13. Dai S., Ward C.R., Graham I.T., French D., Hower J.C., Zhao L., Wang X. Altered volcanic ashes in coal and coal-bearing sequences: a review of their nature and significance. *Earth-Science Reviews*, 2017, vol. 175, pp. 44–74.
 14. Erkoyuna H., Kadira S., Huggett J. Occurrence and genesis of tonsteins in the Miocene lignite, Tunçbilek Basin, Kütahya, western Turkey. *International Journal of Coal Geology*, 2019, vol. 202, pp. 46–68.
 15. Anggara F., Amijaya D.H., Harijoko A., Tambaria T.N., Sahri A.A., Nur Asa Z.A. Rare earth element and yttrium content of coal in the Banko coalfield, South Sumatra Basin, Indonesia: Contributions from tonstein layers. *International Journal of Coal Geology*, 2018, vol. 196, pp. 159–172.
 16. Spears D.A. The origin of tonsteins, an overview, and links with seatearths, fireclays and fragmental clay rocks. *Int. J. of Coal Geol.*, 2012, vol. 94, pp. 22–31.
 17. Crowley S.S., Stanton R.W., Ryer T.A. The effects of volcanic ash on the maceral and chemical composition of the C coal bed, Emery Coal Field, Utah. *Organic Geochemistry*, 1989, vol. 14, pp. 315–331.
 18. Grigorev N.A. Average concentrations of chemical elements in rocks of the upper continental crust. *Geochemistry International*, 2003, vol. 41, no. 7, pp. 711–718.
 19. Admakin L.A. Klassifikatsiya i nomenklatura tonshteynov [Tonsteins: Classification and Nomenclature]. *Lithology and minerals*, 1995, no. 6, pp. 643–653.
 20. Burger K., Zhou Y., Ren Y. Petrography and geochemistry of tonsteins from the 4th Member of the Upper Triassic Xujiache formation in southern Sichuan Province, China. *Int. J. Coal Geol.*, 2002, vol. 49, pp. 1–17.
 21. Winchester J.A., Floyd P.A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, 1977, vol. 20, pp. 325–343.
 22. Hower J.C., Ruppert L.F., Eble C.F. Lanthanide, yttrium, and zirconium anomalies in the Fire Clay coal bed, Eastern Kentucky. *International Journal of Coal Geology*, 1999, vol. 39, pp. 141–153.
 23. Arbuzov S.I., Mezhibor A.M., Spears D.A., Ilenok S.S., Shaldybin M.V., Belaya E.V. Nature of Tonsteins in the Azeisk Deposit of the Irkutsk Coal Basin (Siberia, Russia). *International Journal of Coal Geology*, 2016, vol. 152, pp. 99–111.
 24. Zotova E.A. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta RF. Masshtab 1:1000000 (tretye pokoleniye). Seriya Altaye-Sayanskaya. List N-46, Abakan. Obyasnitelnaya zapiska* [State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1000000 (third generation). Series Altai-Sayan. Sheet N-46, Abakan. Explanatory note]. St-Petersburg, Cartridge factory Russian Geological Research Institute, 2008. 399 p.

Received: 30 January 2019.

Information about the authors

Alexey V. Vergunov, post-graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Sergey I. Arbuzov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Victor M. Sobolenko, chief geologist, JSC « Arshanovsky Coal Mine».