

УДК 552.52:550.42

МИНЕРАЛОГИЯ И ГЕОХИМИЯ ТОНШТЕЙНА ИЗ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА НОВЫЙ-1А ХАРАНОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ЗАБАЙКАЛЬСКИЙ КРАЙ)

Вергунов Алексей Викторович^{1,2},
alexeivergunov@rambler.ru

Арбузов Сергей Иванович^{1,2},
siarbuzov@mail.ru

Соктоев Булат Ринчинович¹,
bulatsoktoev@tpu.ru

Ильенок Сергей Сергеевич¹,
ilenokss@tpu.ru

Чекрыжов Игорь Юрьевич²,
chekr2004@mail.ru

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

² Дальневосточный геологический институт ДВО РАН,
Россия, 690022, г. Владивосток, пр. 100-летия Владивостока, 159.

Актуальность работы обусловлена необходимостью выяснения роли пирокластического материала в формировании угленосных отложений и геохимического фона редких элементов в углях.

Цель: выяснение природы тонштейна из угольного пласта Новый-1а Харанорского бурогоугольного месторождения.

Объекты: угли и тонштейн пласта Новый-1а Харанорского месторождения.

Методы: отбор проб из пласта Новый-1а Харанорского месторождения угля; масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS), атомно-эмиссионная спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ICP-AES), инструментальный нейтронно-активационный анализ (ИНАА); минеральный состав изучен методами оптической микроскопии, сканирующей электронной микроскопии, рентгенофазовым анализом.

Результаты. В ходе исследования был изучен тонштейн из угольного пласта Новый-1а Харанорского бурогоугольного месторождения. Минеральный состав, структурно-текстурные и геохимические особенности тонштейна позволили установить его апопелловый генезис. Комплекс критериев позволил определить состав исходной пирокластики, из которой сформировался тонштейн. Установлено, что изученный тонштейн сформировался из пеллов трахидацитового состава. Высокие содержания редких элементов-примесей в угле пласта Новый-1а приурочены к участкам контакта с тонштейном. Наибольшие концентрации в контактовых зонах отмечены для РЗЭ, Zr, Nb, Y, Ta, Hf, Th и U. Набор элементов и их концентрация в тонштейне и в золе угля на контакте с прослоем подтверждают выводы о природе и исходном составе пирокластики, сформировавшей тонштейн.

Ключевые слова:

Уголь, тонштейн, геохимия, вулканизм, Забайкальский край.

Введение

Следы пирокластического материала в углях надежно диагностируются в виде маломощных глинистых прослоев, в геологической литературе известных под термином тонштейны. Эти породы обнаруживаются во многих угольных бассейнах мира, в углях разной степени (стадий) метаморфизма и различного возраста. Общий список находок тонштейнов можно встретить в ряде обобщающих работ [1–3].

В данной работе рассматриваются особенности минерального и химического состава тонштейна и вмещающего его угля из пласта Новый-1а Харанорского бурогоугольного месторождения. Ранее в угленосных отложениях Забайкальского края наличие тонштейнов не отмечалось.

Выяснение исходного состава и условий формирования тонштейна из угольного пласта Новый-1а позволит оценить роль вулканогенного материала в процессе формирования угленосных отложений мелового

возраста Харанорского месторождения и одновозрастных с ним отложений Забайкальского края, а также уточнить временной период, в который произошло отложение в палеоболотной среде пирокластического материала, впоследствии преобразованного в тонштейн.

Выявление фактов накопления синхронного угленосного пирокластического материала в Харанорском месторождении позволит выявить подобные образования и в других месторождениях региона, в частности в угольных пластах месторождений, расположенных в радиусе нескольких десятков километров.

Геологическая характеристика объекта исследования

В данной работе приведены сведения об исследовании угленосных отложений Харанорского бурогоугольного месторождения, расположенного на юге Забайкальского края (рис. 1). Месторождение является крупнейшим в регионе. Оно находится в северной

части Харанорской депрессии и вытянуто в меридиональном направлении на 22 км при ширине около 8 км. Депрессия с востока ограничена Кукульбейским хребтом, с запада – Адун-Челонским. Южной границей впадины служат отроги Алтаганского хребта, а на севере она переходит в Тургинскую депрессию, от которой отделена увалом [4].



Рис. 1. Расположение Харанорского месторождения
Fig. 1. Location of Kharanor ore field

В разрезе Харанорского месторождения выделяется три горизонта: верхний – мощных угольных пластов (380–400 м), соответствующий кутинской свите, средний – частого переслаивания тонких пластов угля и углистых прослоев (240–260 м) и нижний – песчано-алевритовый, безугольный (250–300 м), соответствующие верхней подсвите тургинской свиты. На месторождении выявлено 60 угольных пластов, из них в подсчёт запасов включено 20. Рабочая мощность пластов в среднем от 1,3 до 13,3 м, максимальная – 49,1 м (пласт Новый-1а) [5]. Угли бурые, гумусовые и отнесены к марке 2БВ – второй бурый витринитовый. Месторождение на сегодняшний день разрабатывается открытым способом ОАО «Разрез Харанорский» Сибирской угольной энергетической компанией «СУЭК» [6].

Пласт Новый-1а расположен в кутинской свите и является самым мощным и главным разрабатываемым на Харанорском месторождении. Пласт характеризуется простым строением. В пласте диагностирован породный прослой (рис. 2), контрастно выделяющийся светлой окраской на фоне угля и имеющий значительную протяженность при сравнительно небольшой средней мощности около 10 см. Прослой прослежен на всей вскрытой разрезом части угольного пласта Новый-1а протяженностью более 5 км. Выяснение природы этого тонштейна позволит дополнить историю формирования отложений в данный период времени.



Рис. 2 Фотография тонштейна в угольном пласте
Fig. 2. Photograph of the tonstein within the coal seam

Методы исследования

Опробование

Образцы отбирались в угольных пластах, вскрытых угледобывающим разрезом в 2010 и 2021 гг. Опробование проводилось в вертикальном разрезе угольного пласта бороздовым методом с шириной борозды 5 см. Всего отобрано 45 проб угля и 5 проб тонштейна

При полевых исследованиях 2010 г. угольный пласт Новый-1а был опробован на всю мощность. Длина пробы колебалась от 3 до 200 см. Сам прослой опробовался на всю мощность. Общая мощность, на которую был опробован угольный пласт, составила 26,9 м.

В 2021 г. опробование было произведено с детализацией части пласта с тонштейном. В этом случае интервал отбора проб составил 2–50 см. Тонштейн опробовался детальнее, была опробована верхняя часть тонштейна – 5 см и нижняя часть – 5 см, при собственной мощности породного прослоя в 10 см (рис. 3). Такое детальное опробование позволяет отметить наличие возможных этапов преобразования исходного пеплового материала при изменении в условиях палеоболота.

В обоих случаях тонштейн опробовался в двух точках, на расстоянии 3–5 м, для прослеживания латерального изменения его минералого-геохимических особенностей.

Аналитические методы

При проведении исследований был применен комплекс аналитических методов, включающий в себя инструментальный нейтронно-активационный анализ (ИНАА), метод масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) и метод атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (ICP-AES).

Исследование проб угля, золы угля и пород методом ИНАА выполнено в ядерно-геохимической лаборатории отделения геологии Национального исследовательского Томского политехнического университета (исполнитель – А.Ф. Судыко). При проведении аналитических исследований использовалась навеска

угля 200 мг, для пород – 100 мг. Облучение проб проводилось на исследовательском ядерном реакторе ИРТ-Т Инженерной школы ядерных технологий ТПУ. Определение химических элементов в пробах осуществлялось без предварительного концентрирования для исключения возможных потерь элементов при озолении [7].

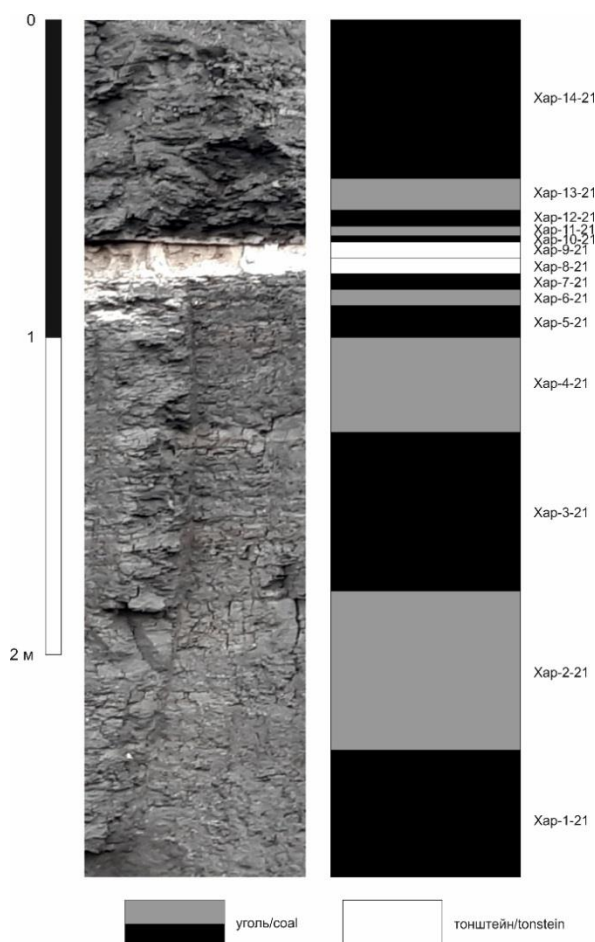


Рис. 3. Схема детального опробования тонштейна и вмещающего его угля

Fig. 3. Scheme of the tonstein and the adjacent coals detailed sampling

Исследование состава методами ICP-MS и ICP-AES выполнено в аналитическом центре Дальневосточного геологического института ДВО РАН (исполнитель Н.В. Зарубина). Оценка содержания малых элементов в углях и внутрипластовых породах выполнена методом вскрытия без предварительного озоления с использованием кислотного разложения ($\text{HClO}_4 + \text{HNO}_3 + \text{HF}$) [8]. Главные породообразующие элементы (Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K, P) определены с помощью ICP-AES.

Метод беспламенной атомной абсорбции применялся при определении концентраций ртути с использованием прибора РА-915+ с пиролитической приставкой ПИРО-915. Массовую долю ртути в образцах можно определять в диапазоне от 10^{-7} до 10^{-3} %.

Структурно-текстурные особенности тонштейнов определялись путем изучения шлифов под оптическим микроскопом.

При использовании метода рентгенофазового анализа (РФА) было проведено исследование минерального состава тонштейнов на дифрактометре Bruker D2 Phaser в МИНОЦ «Урановая геология» в ТПУ (исполнитель Б.Р. Соктоев).

Микроминеральные исследования проводились на двухлучевом сканирующем электронном микроскопе Tescan Lyra 3 XMN + EDS AZtec X-Max 80 Standart в лаборатории микро- и наноисследований аналитического центра ДВГИ ДВО РАН (оператор А.В. Поселюжная), а также на сканирующем электронном микроскопе Hitachi S-3400N с приставкой Bruker в МИНОЦ «Урановая геология» в ТПУ (исполнитель С.С. Ильенок).

Результаты исследования и их обсуждение

Минералогия тонштейна

Детально опробован и исследован тонштейн из угольного пласта Новый-1а Харанорского месторождения. Мощность тонштейна составляет 10 см. Тонштейн имеет светло-серую окраску, что позволяет надежно диагностировать его в угольном пласте (рис. 2). Изучаемый тонштейн имеет четкие границы с вмещающим его углем.

Петрографическое изучение тонштейна в шлифах под микроскопом показало, что породный прослой имеет алевролитовую структуру. Расположение зерен неориентированное, стратификации не наблюдается. Зерна минералов угловатые, без следов окатанности. Основная масса породы глинистая, в ней присутствуют многочисленные порфирикласты кварца. Каолинит прослеживается как в виде основной массы, так и в виде клубков, состоящих из тесно связанных мелких кристаллов каолинита.

Рентгенофазовый анализ показал, что минеральный состав тонштейна представлен преимущественно каолинитом (67,7 %), в меньшей степени кварцем (23,3 %). В составе отмечается наличие КППШ (4,4 %), а также мусковита (4,6 %) (табл. 1). Подобный однообразный минеральный состав характерен практически для всех тонштейнов мира, что позволяет надежно отличать такие прослои от внутрипластовых пород терригенной природы, как правило, имеющих более разнородный минеральный состав.

Таблица 1. Минеральный состав тонштейна из пласта Новый-1а, %

Table 1. Mineral composition of the tonstein from Novy-1a coal seam, %

Минерал Mineral	Верхняя часть Upper part	Нижняя часть Lower part	Весь прослой Whole layer
	Хар-9-21	Хар-8-21	Хар-15-21
Каолинит Kaolinite	64,1	65,3	67,7
Кварц/Quartz	24,7	25,5	23,3
КППШ K-feldspar	5,5	3,8	4,4
Мусковит Muscovite	5,7	5,4	4,6
Сумма/Total	100	100	100

При исследовании для выявления зональности минерального состава отдельно изучались верхняя и нижняя части тонштейна. Согласно результатам рентгенофазового анализа, в верхней части тонштейна содержание КППШ и мусковита больше, чем в нижней. В нижней части тонштейна, соответственно, выше содержания каолинита и кварца.

Такие различия в минеральном составе верхней и нижней частей тонштейнов могут быть следствием преобразования пирокластического материала в условиях палеоболотной среды. Так, в процессе преобразования пирокластического материала, представленного преимущественно вулканическим стеклом, происходит растворение и переработка исходного пепла. Это связано с тем, что агрессивная среда торфяного болота богата органическими кислотами, сама среда является кислой и хорошо обводненной. Тип болот,

распространенный на территории Харанорского месторождения, был преимущественно низинный.

Вулканическое стекло в условиях торфяного болота растворяется и осаждается в виде каолинита. Процесс преобразования пеплов в тонштейны подробно рассмотрен в работах Д.А. Спирса, Р. Канариса-Сотиру, Б.Ф. Бохора и Д.М. Триппехорна [2, 9].

При исследовании микроминерального состава тонштейна найдены разнообразные акцессорные минералы, в том числе хорошо ограненные кристаллы циркона (рис. 4). Встречаются характерные кавернозные зерна циркона, что свидетельствует о возможном процессе их растворения в процессе преобразования пирокластического материала.

Находки кавернозных кристаллов циркона со следами коррозии известны также в тонштейнах из угольных пластов черноморской свиты Минусинского бассейна [10].

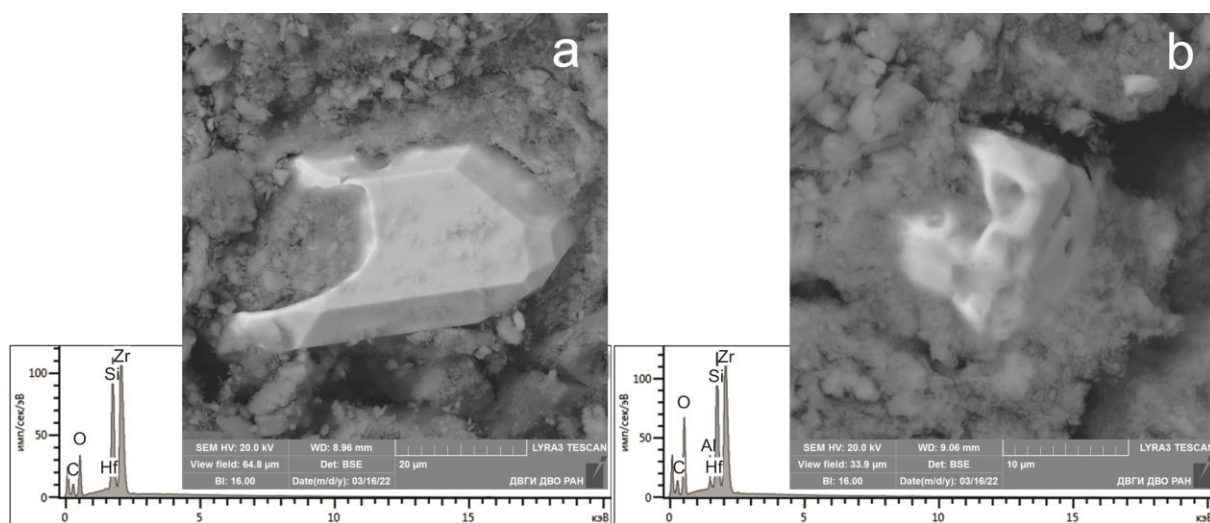


Рис. 4. Кристаллы циркона в тонштейне: а) с четкими границами; б) со следами коррозии

Fig. 4. Zircon crystals in the tonstein: a) with clean faces; b) with instances of corrosion

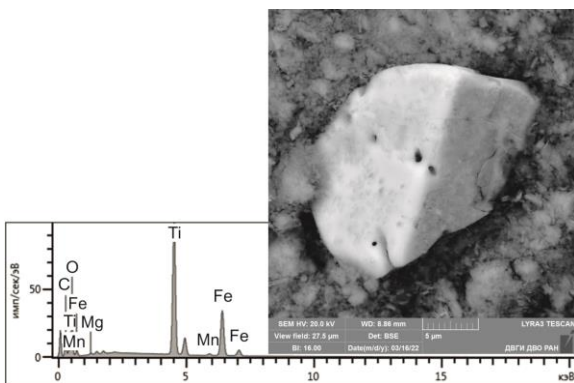


Рис. 5. Зерно ильменита

Fig. 5. Ilmenite grain

Помимо цирконов при электронно-микроскопических исследованиях диагностируются такие минералы, как бадделейт, пирит, халькопирит, сфалерит, редкоземельные фосфаты, барит, КППШ. В составе тонштейна также встречаются зерна титановых минералов, чаще представленные ильменитом. На рис. 5 представлена фотография зерна ильменита с отверстиями, вероятно,

образовавшимися в процессе изменения исходного пеплового материала. В практике изучения минерального состава тонштейнов известны случаи находок измененных кристаллов ильменита. Так, в работе Б.Ф. Бохора и Д.М. Триппехорна приводится фотография измененного кристалла ильменита из тонштейна Фаер Клей (Кентукки). Железо было выщелочено из минерала, в результате чего осталась лишь сетка из TiO_2 (анатаза) [2].

Геохимия и природа тонштейна

Тонштейн из угольного пласта Новый-1а характеризуется высоким содержанием Ga, Nb, Ta, Sn, Hf, Th и U по сравнению со средним составом глинистых сланцев (табл. 2). Набор химических элементов, которыми обогащен тонштейн, вероятно, обусловлен составом исходного вещества, которым мог служить пирокластический материал, поступивший в болотную среду.

Для выяснения природы исходного материала Я.Э. Юдович и М.П. Кетрис предложили использовать отношение TiO_2 к Al_2O_3 (титановый модуль), так как низкие значения отношения этих элементов характерны для пирокластического материала кислого

состава в осадках [12]. Впоследствии Д.А. Спирс и Р. Канарис-Сотириу установили, что для тонштейнов, сформированных из пирокластике кислого состава, характерна величина TiO_2/Al_2O_3 меньше 0,02, а основного состава – выше 0,06 [9]. Промежуточные значения титанового модуля характерны для средней и щелочной пирокластике.

Таблица 2. Содержание микроэлементов в тонштейне, г/т
Table 2. Trace elements content in tonstein, ppm

Элементы Elements	Верхняя часть Upper part Хар-9-21	Нижняя часть Lower part Хар-8-21	Весь прослой Whole layer Хар-15-21	Кларк глинистых сланцев [11] Clarke of clay shales [11]
Li	13,3	12,7	13,5	46,0
Be	0,47	0,53	0,54	2,80
Sc	2,66	2,68	2,57	15,0
V	14,5	14,6	13,7	120
Cr	8,12	7,62	8,12	76,0
Co	0,61	0,92	0,81	19,0
Ni	2,16	2,96	2,41	47,0
Cu	5,35	6,07	5,45	36,0
Zn	16,5	28,2	22,8	52,0
Ga	41,7	40,1	41,0	16,0
Ge	1,94	1,43	1,65	2,00
As	4,85	3,70	4,77	9,30
Se	0,49	0,45	0,48	0,36
Rb	21,1	22,8	22,0	130
Sr	63,1	60,0	56,5	240
Y	8,95	8,89	8,76	31,0
Zr	171	156	142	190
Nb	47,7	46,3	46,4	11,0
Mo	0,71	1,02	0,65	1,60
Ag*	0,47	0,45	0,43	0,20
Cd	0,45	0,56	0,51	1,00
Sn	6,10	5,95	5,18	3,50
Sb	0,54	0,54	0,57	1,00
Te	0,03	0,03	0,03	0,01
Cs	2,55	2,63	2,33	10,0
Ba	115	119	118	460
La	28,1	29,6	29,8	48,0
Ce	53,9	56,2	55,4	75,0
Pr	4,72	4,90	4,88	10,0
Nd	20,3	21,1	21,1	36,0
Sm	3,65	3,87	3,82	8,00
Eu	0,33	0,33	0,33	1,20
Gd	2,62	2,70	2,68	5,80
Tb	0,37	0,37	0,37	0,83
Dy	1,63	1,64	1,62	4,40
Ho	0,30	0,29	0,29	0,70
Er	0,88	0,86	0,87	1,90
Tm	0,12	0,12	0,12	0,60
Yb	0,97	0,97	0,99	2,50
Lu	0,11	0,11	0,11	0,39
Hf	11,6	10,4	10,3	5,00
Ta	10,7	9,0	9,2	1,40
W	2,62	2,59	2,61	2,60
Au	0,0020	0,0016	0,0019	0,0065
Hg, ppb	262	291	286	–
Tl	0,20	0,20	0,18	1,30
Pb	7,45	8,29	8,39	14,0
Bi	0,35	0,40	0,39	0,38
Th	15,4	13,7	13,5	10,0
U	8,78	8,07	7,82	4,50
ΣРЗЭ	118	123	122	195
ΣРЗЭ+Y	127	132	131	226
Th/U	1,75	1,70	1,73	2,22

Примечание/Note: «–» – нет данных/no data.

Величина титанового модуля для тонштейна из угольного пласта Новый-1а составила 0,012–0,013, что свидетельствует о вкладе пирокластике кислого состава при формировании изучаемого прослоя (табл. 3).

Таблица 3. Химический состав (вес. %) тонштейна пласта Новый-1а
Table 3. Major elements concentrations (%) in tonstein from Novy-1a coal seam

Элементы Elements	Верхняя часть Upper part Хар-9-21	Нижняя часть Lower part Хар-8-21	Весь прослой Whole layer Хар-15-21
SiO ₂	46,9	47,6	46,4
TiO ₂	0,43	0,41	0,41
Al ₂ O ₃	34,2	33,7	34,0
Fe ₂ O ₃	0,37	0,39	0,34
MnO	0,003	0,003	0,003
MgO	0,17	0,17	0,15
CaO	0,24	0,22	0,19
Na ₂ O	0,021	0,023	0,015
K ₂ O	0,60	0,66	0,63
P ₂ O ₅	0,028	0,027	0,042
П.п.п/LOI	17,0	16,8	17,8
TiO ₂ /Al ₂ O ₃	0,013	0,012	0,012

Примечание: П.п.п – потери при прокаливании.

Note: LOI – loss on ignition.

Изученный тонштейн по своему химическому составу приближен к каолиниту, однако характеризуется повышенным содержанием кремнезема. Это свидетельствует о повышенной кремнистости тонштейна по сравнению с чистым каолинитом. Переизбыток SiO₂ представлен чаще в виде алевритовых зерен кластогенного кварца.

Для идентификации преобразованной пирокластике обычно применяется комплекс критериев, включающий титановый модуль, классификационную диаграмму Винчестера и Флойда (Nb/Y-Zr/TiO₂), графики распределения РЗЭ, содержание редких и радиоактивных элементов [13–16].

На классификационной диаграмме Винчестера–Флойда изученные образцы тонштейна занимают промежуточное положение между полями, соответствующими трахитам, трахиандезитам и базанитам/нефелинитам (рис. 6). Ранее установлено, что дискриминационная диаграмма имеет свои особенности в применении [14, 17]. Обосновано это тем, что химические элементы, на основании которых построена данная диаграмма, обладают различной миграционной способностью в условиях палеоболота. Следовательно, наблюдается более интенсивный вынос циркония и ниобия из прослоя, чем титана и иттрия. Эта особенность ведет к снижению кислотности и щелочности исходных пород диаграммы. Это необходимо учитывать, при использовании данной диаграммы и подтверждать данные путем применения дополнительных критериев диагностики исходного состава пирокластического материала.

Данные о РЗЭ позволяют делать выводы о генезисе исходного вещества горных пород. Распределение нормализованных по кларку в верхней континентальной коре РЗЭ для проб изучаемого тонштейна характеризует наличие ярко выраженной отрицательной

европиевой аномалии (рис. 7). Также на графиках наблюдаются отрицательная аномалия празеодима и положительная аномалия иттербия. Обе аномалии слабо выражены. Подобные нормированные графики распределения РЗЭ характерны для тонштейнов мира, что позволяет отличать такие прослои от терригенных пород.

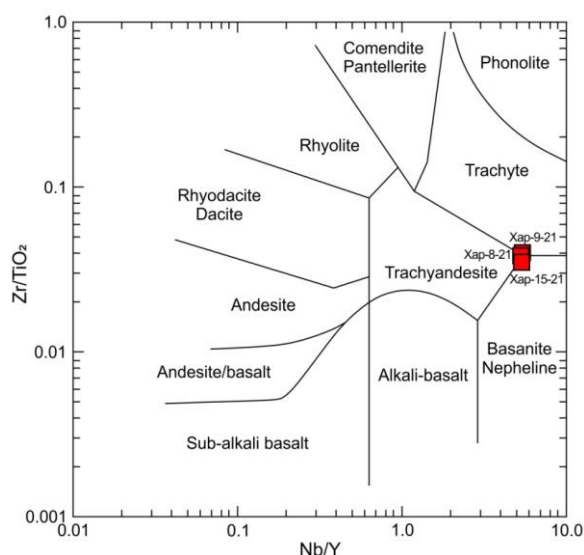


Рис. 6. Положение изученных проб на Zr/TiO_2 – Nb/Y классификационной диаграмме [18]

Fig. 6. Location of the studied samples according to Zr/TiO_2 – Nb/Y classification diagram [18]

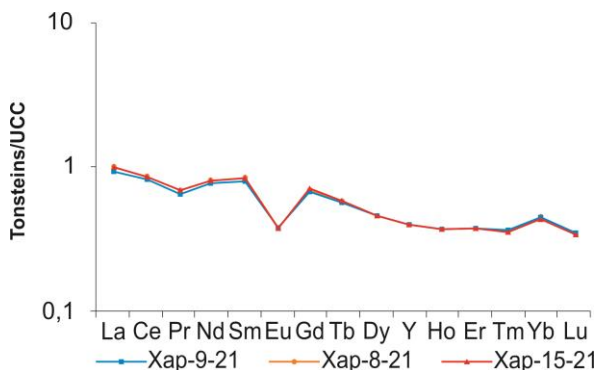


Рис. 7. Распределение РЗЭ в тонштейне. Нормировано на кларк в верхней континентальной земной коре [19]

Fig. 7. Upper continental crust (UCC)-normalized REE patterns in tonstein. UCC data from [19]

Диаграмма РЗЭ, нормализованных по хондриту, помогает восстановить состав исходной пирокластике, сформировавшей тонштейны. Кривые распределения для изученных проб тонштейна характеризуются отчетливой отрицательной европиевой аномалией, а также преобладанием легких лантаноидов над тяжелыми (рис. 8). Такой тип распределения РЗЭ характерен для тонштейнов, сформированных при участии пеплового материала кислого состава.

Радиоактивные элементы могут служить действенным критерием для восстановления исходного состава пирокластического материала тонштейнов.

Для тонштейнов, сформированных из пирокластике кислого и щелочного составов, характерны высокие содержания тория и урана [17]. Низкие содержания этих элементов свидетельствуют о вкладе пеплов среднего и основного составов.

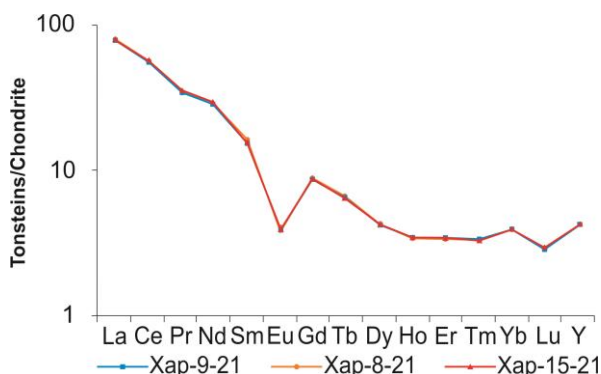


Рис. 8. Распределение РЗЭ в тонштейне. Нормировано на хондрит [20]

Fig. 8. Chondrite-normalized REE patterns in tonstein. Chondrite data from [20]

Содержания тория в пробах изученного тонштейна из угольного пласта Новый-1а варьируют в пределах 13,5–15,4 г/т, урана – 7,8–8,8 г/т. Такие содержания тория и урана свидетельствуют о кислом составе пирокластике, из которого был сформирован изучаемый тонштейн.

Так как на геохимические особенности тонштейнов влияет состав исходного материала, необходимо обсудить и другие элементы, слабо мигрирующие в процессе преобразования пеплового материала и позволяющие восстановить первичный состав измененной пирокластике. К таким элементам можно отнести Nb, Y, Zr, Hf, Ta.

Концентрация Nb в тонштейне достигает 46,4 г/т, Zr – 142 г/т, Hf – 10,3 г/т, Ta – 9,2 г/т. Содержания этих элементов в тонштейне сопоставимы с концентрациями в породах кислого состава. Также накопление данных элементов характерно для тонштейнов мира, сформировавшихся из пирокластике кислого и щелочного составов [14].

При исследованиях встречаются кристаллы цирконов, на поверхности которых расположены землистые агрегаты ксенотима (рис. 9), что свидетельствует об активной миграции вещества в процессе преобразования пирокластического материала, в том числе и таких элементов, как Y.

Затруднения при восстановлении исходного состава преобразованного пирокластического материала вызывает процесс перераспределения вещества в условиях палеоболотной среды [21–25]. Следовательно, в угле, вмещающем тонштейн, диагностируются специфические геохимические ассоциации, связанные с особенностями состава пирокластического материала, из которого сформировался тонштейн.

Во время преобразования вулканического пепла элементы-гидролизаты, даже титан, становятся подвижными. Это приводит к их перераспределению и формированию новообразованных минеральных фаз,

которые диагностируются в тонштейнах как аутигенные минералы. Новообразованные минеральные фазы титана представляют собой оторочки, сформированные вокруг органического вещества, часто на контакте тонштейна с углем [17]. Однако подобных образований не обнаружено при исследовании угля, вмещающего тонштейны, что свидетельствует о минимальном выносе титана за пределы глинистых прослоев.

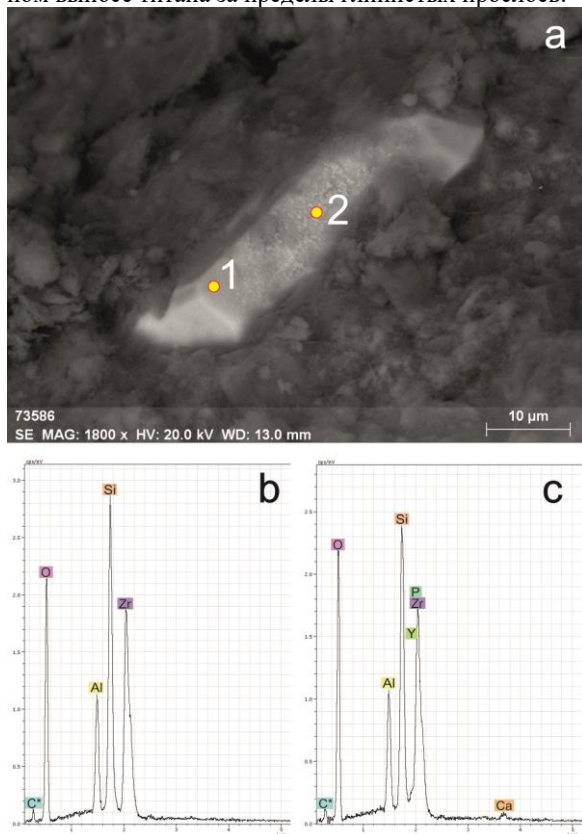


Рис. 9. Землистый агрегат ксенотима на кристалле циркона: а) изображение образца в обратно рассеянных электронах; б) спектр циркона (точка 1; в) спектр ксенотима (точка 2; г)

Fig. 9. Earthy aggregate of xenotime on the zircon grain: а) backscattered image of the sample; б) zircon spectrum (site 1; в) xenotime spectrum (site 2; г)

Периодически в тонштейнах выявляются корродированные кавернозные кристаллы цирконов, что свидетельствует об их разрушении в процессе перераспределения вещества. На этот процесс также указывают аномально высокие концентрации циркония в золе угля, находящегося выше и ниже тонштейнов.

Геохимия угля, вмещающего тонштейн

Повышенное содержание элементов, в том числе Nb, Y, Zr, Hf, Ta, Th, не ограничивается непосредственно самим тонштейном, а прослеживается и в угле на контакте с породным прослоем. Зона обогащения углей, вмещающих тонштейны, диагностируется как непосредственно на контакте с тонштейном, так и на некотором удалении от него. Наиболее высокие концентрации элементов отмечаются в золе притонштейнового угля. Приуроченность зон обогащения непосредственно к тонштейну и высоко контрастные

концентрации элементов в них свидетельствуют об их связи с преобразованным породным прослоем.

Все повышенные содержания элементов-примесей в угле и золе угля в пласте Новый-1а приурочены к тонштейну. Так, концентрация циркония в золе угля, находящегося под тонштейном, достигает 3962 г/т, а над ним – 4028 г/т (рис. 10). Наибольшая концентрация ниобия в золе угля над тонштейном составляет 1042 г/т, под тонштейном – 628 г/т (рис. 10), для иттрия над тонштейном – 116,4 г/т, под ним – 116 г/т. Для ниобия и иттрия отмечается более обширная зона обогащения, чем для циркония, что свидетельствует о большей подвижности ниобия и иттрия в условиях гипергенеза. Этот факт стоит учитывать при использовании данных элементов при реставрации состава измененной пирокластике, например, при использовании классификационной диаграммы Винчестера и Флойда.

Содержание гафния в золе угля над тонштейном составило 81,2 г/т, под тонштейном – 99,4 г/т. Для тантала концентрация в золе угля выше тонштейна составила 17,2 г/т, ниже – 21,1 г/т. Концентрация тория в золе угля над и под тонштейном достигает 167 и 189 г/т, соответственно. Содержание урана над прослоем составило 68,7 г/т, под ним – 55,9 г/т. Накопление РЗЭ в золе угля достигает 498 г/т над тонштейном и 1082 г/т под ним (рис. 10). Наиболее подвижными из этой группы элементов являются РЗЭ. Это подтверждается широкой зоной обогащения РЗЭ золы углей, на которую оказал влияние пирокластический материал.

Для оценки условий накопления лантаноидов в углях были пронормированы содержания РЗЭ в золе угля, а также в самом угле на кларк в земной коре. При анализе кривых распределения РЗЭ мы руководствовались рекомендациями В.В. Середина и Ш. Дая [26].

Графики распределения РЗЭ в угле, находящемся выше тонштейна, отнесены к Н-типу (рис. 11, а), лишь график для пробы угля (Хар-10-21), находящегося непосредственно на контакте с тонштейном, имеет L-тип (рис. 11, б). Все спектры характеризуются отрицательной европиевой аномалией, что свидетельствует о связи накопления РЗЭ с пирокластическим материалом кислого состава. Также отмечается наличие отрицательной аномалии празеодима и положительной иттербия, обе аномалии являются слабовыраженными.

Характер нормированных графиков распределения РЗЭ в угле под тонштейном вблизи контакта с ним (рис. 11, в) аналогичен таковым для угля над тонштейном и схож с самим тонштейном, что свидетельствует о влиянии в обоих случаях пеплового материала на накопление РЗЭ. Для всех указанных спектров характерна отрицательная европиевая аномалия, слабо выраженные Pr- и Yb-аномалии. Ниже лежащий уголь (Хар-3-21) отличается L-М-типом распределения РЗЭ (рис. 11, д), европиевая аномалия становится слабо выраженной, что свидетельствует об уменьшении воздействия пирокластического материала на накопление РЗЭ в угле. В спектре данной пробы угля отмечается положительные аномалии Y и Yb.

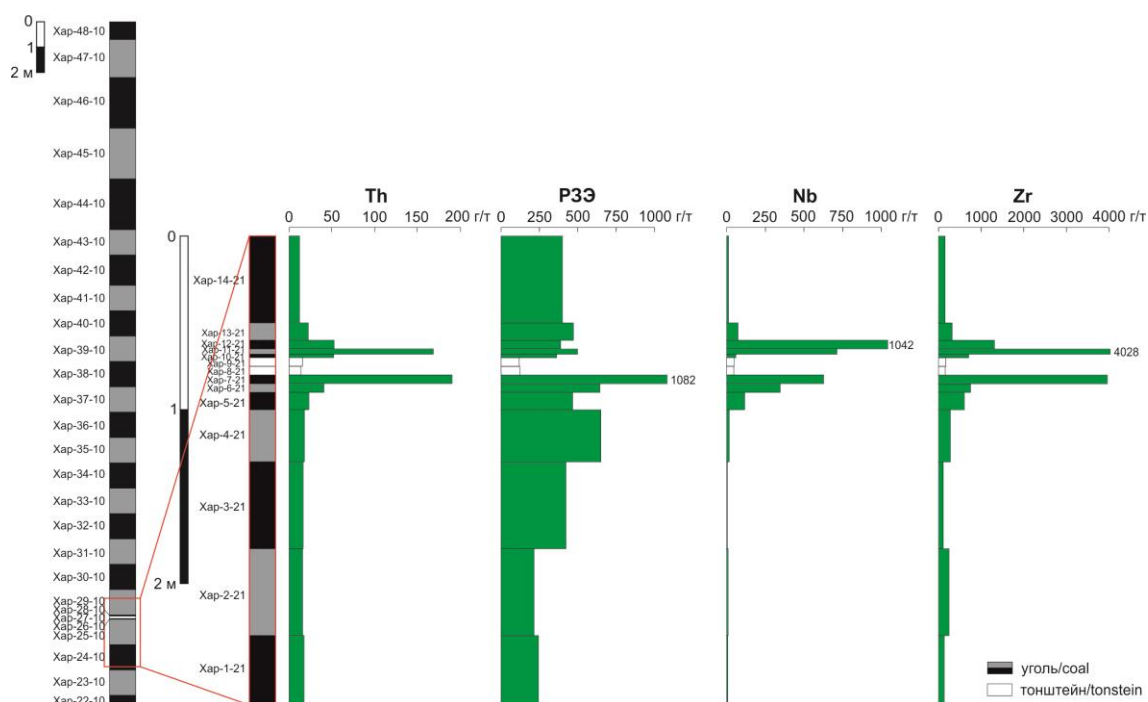


Рис. 10. Распределение Th, P3Э, Nb, Zr в золе угля в вертикальном разрезе пласта Новый-1а

Fig. 10. Distribution of Th, REE, Nb, Zr in coal ash (vertical cross section of Novy-1a coal seam)

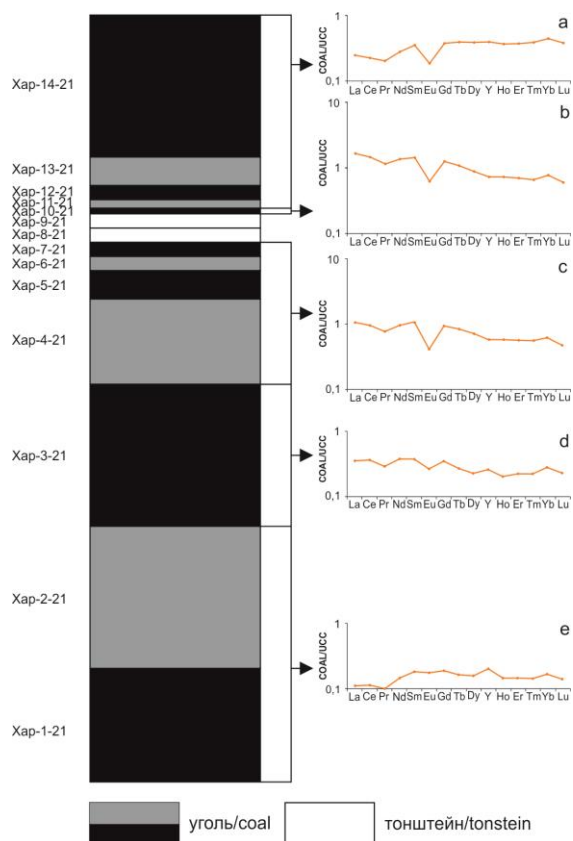


Рис. 11. Распределение P3Э в угле над и под тонштейном: а) H-тип; б, в) L-тип; д) L-M-тип; е) H-M-тип распределения P3Э. Нормировано на кларк в верхней континентальной земной коре [19]

Fig. 11. REE distribution patterns in coals above and under tonstein: а) H-type; б, в) L-type; д) L-M-type; е) H-M-type. Normalized by average REY content of upper continental crust (UCC) [19]

Графики распределения P3Э в угле (Хар-2-21, Хар-1-21), находящемся на удалении от тонштейна, относятся к H-M-типу (рис. 11, е), указывающему на гидрогенный механизм накопления лантаноидов. Графики характеризуются отсутствием отрицательной аномалии Eu. Однако отмечена отрицательная аномалия Pr, положительные аномалии Y и Yb.

Таким образом, использование комплекса методов, учитывающих минералого-геохимические особенности изучаемых пород, позволило реставрировать состав исходного материала, послужившего источником для формирования тонштейна в угольном пласте Новый-1а, как трахидацитовый.

В связи с поступлением пеплового материала в палеоторфяник и его дальнейшим преобразованием в углях за пределами тонштейна сформировались контрастные геохимические аномалии большой группы элементов (P3Э, Zr, Nb, Y, Ta, Hf, Th и U), определивших геохимическую специализацию угольных пластов и месторождений региона. Из этих данных также следует, что вулканизм этого периода не является источником аномального накопления W, Mo и Ge, характерного для многих угольных месторождений западного и центрального Забайкалья [27].

Заключение

Изучены минералого-геохимические особенности тонштейна из угольного пласта Новый-1а бурогоугольного Харанорского месторождения. Минеральный состав, структурно-текстурные и геохимические особенности тонштейна позволили установить апопепловый генезис данного породного прослоя.

Данные, полученные в результате проведенного исследования, свидетельствуют о том, что изученный

тонштейн сформировался при участии кислой щелочной пирокластики (трахидацит).

Установлено обогащение углей под влиянием преобразования пирокластики широкой группой литофильных редких элементов, характерных для кислой и щелочной пирокластики. Наиболее высокие содержания редких элементов-примесей в угле, а особенно в золе угля пласта Новый-1а приурочены к участкам контакта тонштейна и угля. Наиболее значительное обогащение характерно для РЗЭ, Zr, Nb,

Y, Ta, Hf, Th и U. Набор элементов и их концентрация в тонштейне и в золе угля на контакте с прослоем подтверждают выводы о природе и исходном составе пирокластики, сформировавшей тонштейн, и указывают на важную роль вулканизма в формировании геохимической специализации месторождений угля.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черновьянц М.Г. Тонштейны и их использование при изучении угленосных формаций. – М.: Недра, 1992. – 144 с.
2. Bohor B.F., Triplehorn D.M. Tonsteins: altered volcanic-ash layers in coal-bearing sequences. – Boulder, Colorado, Geological Society of America Special Paper, 1993. – 285 p.
3. 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. URL: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.10.005> (дата обращения 15.05.2022).
4. Угольная база России. Т. IV. Угольные бассейны и месторождения Восточной Сибири. – М.: ЗАО «Геоинформарк», 2002. – 493 с.
5. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200000. Издание второе. Серия Приаргунская. Лист М50-XV, XXI (Борзя, Даурия). Объяснительная записка. – М.: МФ ВСЕГЕИ, 2015. – 206 с.
6. Усреднение качества бурого угля на Харанорском буровугольном месторождении / Ю.М. Овешников, Ю.В. Субботин, П.Б. Авдеев, А.Г. Самойленко // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2016. – № 4. – С. 326–337.
7. Судыко А.Ф. Определение элементного состава углей и зол нейтронно-активационным методом // *Проблемы и перспективы развития материально-сырьевой базы и предприятий ТЭК Сибири: Материалы межрегиональной научно-практической конференции*. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – С. 293–297.
8. Аналитические подходы к количественному определению содержания химических элементов в углях и углистых породах с использованием методов ИСП-МС и ИНАА / Н.В. Зарубина, М.Г. Блохин, Д.С. Остапенко, И.Ю. Чекрыжов, С.И. Арбузов, А.Ф. Судыко // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 3. – С. 99–112. URL: <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/3/3105> (дата обращения 15.05.2022).
9. Spears D.A., Kanaris-Sotiriou R. A geochemical and mineralogical investigation of some British and other European tonsteins // *Sedimentology*. – 1979. – V. 26. – P. 407–425. URL: <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1979.tb00917.x> (дата обращения 15.05.2022).
10. Вергунов А.В. Минералогия и геохимия тонштейнов в углях Черногорского месторождения Минусинского бассейна // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 6. – С. 118–129. URL: <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/6/3242> (дата обращения 15.05.2022).
11. Grigorev N.A. Average concentrations of chemical elements in rocks of the upper continental crust // *Geochemistry International*. – 2003. – V. 41. – № 7. – P. 711–718.
12. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Основы литохимии. – СПб: Наука, 2000. – 479 с.
13. Nature of tonsteins in the Azeisk deposit of the Irkutsk Coal Basin (Siberia, Russia) / S.I. Arbuzov, A.M. Mezhibor, D.A. Spears, S.S. Ilenok, M.V. Shal'dybin, E.V. Belaya // *International Journal of Coal Geology*. – 2016. – V. 152. – P. 99–111. URL: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2015.12.001> (дата обращения 15.05.2022).
14. Spears D.A., Arbuzov S.I. A geochemical and mineralogical update on two major tonsteins in the UK Carboniferous Coal Measures // *International Journal of Coal Geology*. – 2019. – V. 210. URL: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2019.05.006> (дата обращения 15.05.2022).
15. An unusual occurrence of ferroan magnesite in a tonstein from the Minusinsk Basin in Siberia, Russia / L.N. Thompson, R.B. Finkelman, S.I. Arbuzov, D.H. French // *Chemical Geology*. – 2021. – V. 568. URL: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2021.120131> (дата обращения 15.05.2022).
16. Geochemical characteristics and the significance of two major coal-bearing strata claststones from the Datong Coalfield (North China) / L. Liu, J. Li, J. Zhang, R. Hao, X. Kang, Q. Liu // *Geological Journal*. – 2022. – P. 1–19. URL: <https://doi.org/10.1002/gj.4389> (дата обращения 15.05.2022).
17. 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 ЦНТИ, 2017. – С. 35–37.
18. 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. URL: [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(77\)90057-2](https://doi.org/10.1016/0009-2541(77)90057-2) (дата обращения 15.05.2022).
19. Taylor S.R., McLennan S.M. The continental crust: its composition and evolution. – Oxford: Blackwell Scientific, 1985. – 312 p.
20. McDonough W.F., Sun S. The composition of the Earth // *Chemical Geology*. – 1995. – V. 120. – P. 223–253. URL: [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4) (дата обращения 15.05.2022).
21. 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. – V. 14. – P. 315–331.
22. Hower J.C., Ruppart L.F., Cortland F.E. Lanthanide, yttrium, and zirconium anomalies in the fire clay coal bed, eastern Kentucky // *International Journal of Coal Geology*. – 1999. – V. 39. – P. 141–153. URL: [https://doi.org/10.1016/S0166-5162\(98\)00043-3](https://doi.org/10.1016/S0166-5162(98)00043-3) (дата обращения 15.05.2022).
23. Petrology of the Fire Clay coal, Bear Branch, Perry County, Kentucky / J. C. Hower, C. F. Eble, M. Mastalerz // *International Journal of Coal Geology*. – 2022. – V. 249. URL: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2021.103891> (дата обращения 15.05.2022).
24. Mineralogy and geochemistry of the no. 6 coal (Pennsylvanian) in the Junger coalfield, Ordos basin, China / S. Dai, D. Ren, C.-L. Chou, S. Li, Y. Jiang // *International Journal of Coal Geology*. – 2006. – V. 66. – P. 253–270. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2005.08.003> (дата обращения 15.05.2022).
25. Mineralogy and geochemistry of boehmite-rich coals: new insights from the Haerwusu surface mine, Jungar coalfield, Inner Mongolia, China / S. Dai, D. Li, C.-L. Chou, L. Zhao, Y. Zhang, D. Ren, Y. Ma, Y. Sun // *International Journal of Coal Geology*. – 2008. – V. 74. – P. 185–202. URL: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2008.01.001> (дата обращения 15.05.2022).

26. Seredin V., Dai S. Coal deposits as potential alternative sources for lanthanides and yttrium // International Journal of Coal Geology. – 2012. – V. 94. – P. 67–93. URL: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2011.11.001> (дата обращения 15.05.2022).
27. Мейтов Е.С. Металлоносность углей // Угольная база России. Т. IV. Угольные бассейны и месторождения Восточной Сибири (Тунгусский и Таймырский бассейны, месторождения Забайкалья). – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 2001. – С. 293–301.

Поступила 04.06.2022 г.

Информация об авторах

Вергунов А.В., кандидат геолого-минералогических наук, учебный мастер отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета; старший научный сотрудник Дальневосточного геологического института ДВО РАН.

Арбузов С.И., доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета; заместитель директора по научной работе Дальневосточного геологического института ДВО РАН.

Соктоев Б.Р., кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Ильенок С.С., кандидат геолого-минералогических наук, старший преподаватель отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Чекрыжов И.Ю., научный сотрудник лаборатории геохимии Дальневосточного геологического института ДВО РАН.

UDC 552.52:550.42

MINERALOGY AND GEOCHEMISTRY OF TONSTEIN FROM COAL SEAM NOVY-1A, KHARANOR DEPOSIT (ZABAYKALSKY KRAI)

Alexey V. Vergunov^{1,2},
alexeivergunov@rambler.ru

Sergey I. Arbuzov^{1,2},
siarbuzov@mail.ru

Bulat R. Soktoev¹,
bulatsoktoev@tpu.ru

Sergey S. Ilenok¹,
ilenokss@tpu.ru

Igor Yu. Chekryzhov²,
chekr2004@mail.ru

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

² Far East Geological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,
159, 100-letiya Vladivostoka avenue, Vladivostok, 690022, Russia.

The relevance of the work is conditioned by the need to clarify the role of pyroclastic material in the formation of coal-bearing deposits and the geochemical background of rare elements in coal.

The main aim is to discover the nature of tonstein from the Novy-1a coal seam of the Kharanor brown coal deposit.

Objects: coal and tonstein of the Novy-1a coal seam from Kharanor coal field.

Methods: sampling of the Novy-1a coal seam at the Kharanor coal deposit; chemical composition was determined by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS), inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES), instrumental neutron activation analysis (INAA); mineral composition was studied by optical microscopy, scanning electron microscopy, X-ray diffractometry.

Results. As a part of the study, tonstein from the Novy-1a coal seam at the Kharanor brown coal deposit was investigated. Mineral composition, structural-textural and geochemical features of tonstein allowed us to establish its altered volcanic genesis. A set of criteria made it possible to determine the composition of the initial pyroclastic material from which tonstein was formed. We established that the studied tonstein was formed from ashes of trachydacite composition. High concentrations of rare trace elements in coal are confined to contact zones with tonstein. The highest concentrations in the contact zones were noted for REE, Zr, Nb, Y, Ta, Hf, Th and U. List of chemical elements and their concentrations in tonstein and in coal ash on contact with the interlayer confirm the conclusions about the nature and initial composition of the pyroclastic material that formed tonstein.

Key words:

Coal, tonstein, geochemistry, volcanism, Zabaykalsky Krai.

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

REFERENCES

- Chernovyants M.G. *Tonштейны и их использование при изучении угленосных формаций* [Tonsteins and their use in the study of coal-bearing formations]. Moscow, Nedra Publ., 1992. 144 p.
- Bohor B.F., Triplehorn D.M. *Tonsteins: altered volcanic-ash layers in coal-bearing sequences*. Boulder, Colorado, Geological Society of America Special Paper, 1993. 285 p.
- 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. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.10.005> (accessed 15 May 2022).
- Ugolnaya baza Rossii. T. 4. *Ugolnye bassejny i mestorozhdeniya Vostochnoy Sibiri* [Coal base of Russia. Vol. IV. Coal basins and deposits of Eastern Siberia]. Moscow, Geoinformark Publ., 2002. 493 p.
- Gosudarstvennaya geologicheskaya karta RF. *Masshtab 1:2000. Izdanie vtoroe. Seriya Priargunskaya. List M50-XV (Borzya, Dauria)*. Obyasnitelnaya zapiska [State geological map of the Russian Federation. Scale 1:2000 (second series). Series Priargunskaya. Sheet M50-XV, Borzya, Dauria. Explanatory note]. Moscow, Cartridge factory Russian Geological Research Institute Publ., 2015. 206 p.
- Oveshnikov Y.M., Subbotin Yu.V., Avdeev P.B., Samoilenko A.G. *Usrednenie kachestva burogo uglya na Kharanorskom burougolnom mestorozhdenii* [Averaging the quality of brown coal at the Kharanor brown coal deposit]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2016, no. 6, pp. 326–337.
- Sudyko A.F. *Opredeleniye elementnogo sostava ugley i zol neytronno-aktivatsionnym metodom* [Determination of the elemental composition of coals and ashes by the neutron activation method]. *Problemy i perspektivy razvitiya materialno-syryevoy bazy i predpriyatiy TEK Sibiri: Materialy mezhdregional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Problems and prospects for the development of the material and raw materials base and enterprises of the fuel and energy complex of Siberia: Proceedings of the interregional scientific and practical conference]. Tomsk: House of TPU Publ., 2007. – pp. 293–297.
- Zarubina N.V., Blokhin M.G., Ostapenko D.S., Chekryzhov I.Yu., Arbuzov S.I., Sudyko A.F. Analytical approaches to the quantitative determination of the chemical elements content in coals and coal rocks using ICP-MS and INAA methods. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021,

- vol. 332, no. 3, pp. 99–112. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/3/3105> (accessed 15 May 2022).
9. Spears D.A., Kanaris-Sotiriou R. A geochemical and mineralogical investigation of some British and other European tonsteins. *Sedimentology*, 1979, vol. 26, pp. 407–425. Available at: <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1979.tb00917.x> (accessed 15 May 2022).
 10. Vergunov A.V. Mineralogy and geochemistry of tonsteins in the coals of the Chernogorsk deposit of the Minusinsk Basin. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 6, pp. 118–129. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/6/3242> (accessed 15 May 2022).
 11. 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.
 12. Yudovich Ya.E., Ketris M.P. *Osnovy litokhimii* [Foundations of lithochemistry]. St-Petersburg, Nauka Publ., 2000. 479 p.
 13. 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. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2015.12.001> (accessed 15 May 2022).
 14. Spears D.A., Arbuzov S.I. A geochemical and mineralogical update on two major tonsteins in the UK Carboniferous Coal Measures. *International Journal of Coal Geology*, 2019, vol. 210, article 103199. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2019.05.006> (accessed 15 May 2022).
 15. Thompson L.N., Finkelman R.B., Arbuzov S.I., French D.H. An unusual occurrence of ferroan magnesite in a tonstein from the Minusinsk Basin in Siberia, Russia. *Chemical Geology*, 2021, vol. 568, article 120131. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2021.120131> (accessed 15 May 2022).
 16. Liu L., Li J., Zhang J., Hao R., Kang X., Liu Q. Geochemical characteristics and the significance of two major coal-bearing strata claystones from the Datong Coalfield (North China). *Geological Journal*, 2022, pp. 1–19. Available at: <https://doi.org/10.1002/gj.4389> (accessed 15 May 2022).
 17. 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 Petrographic Conference with international participation]. Tomsk, Tomsk scientific and technical information center Publ., 2017. pp. 35–37.
 18. 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. Available at: [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(77\)90057-2](https://doi.org/10.1016/0009-2541(77)90057-2) (accessed 15 May 2022).
 19. Taylor S.R., McLennan S.M. *The continental crust: its composition and evolution*. Oxford, Blackwell Scientific, 1985. 312 p.
 20. McDonough W.F., Sun S.-S. The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 1995, vol. 120, pp. 223–253. Available at: [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4) (accessed 15 May 2022).
 21. 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.
 22. Hower J.C., Ruppert L.F., Cortland F.E. Lanthanide, yttrium, and zirconium anomalies in the fire clay coal bed, eastern Kentucky. *International Journal of Coal Geology*, 1999, vol. 39, pp. 141–153. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0166-5162\(98\)00043-3](https://doi.org/10.1016/S0166-5162(98)00043-3) (accessed 15 May 2022).
 23. Hower J.C., Eble C. F., Mastalerz M. Petrology of the Fire Clay coal, Bear Branch, Perry County, Kentucky. *International Journal of Coal Geology*, 2022, vol. 249, article 103891. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2021.103891> (accessed 15 May 2022).
 24. Dai S., Ren D., Chou C.-L., Li S., Jiang Y. Mineralogy and geochemistry of the no. 6 coal (Pennsylvanian) in the Junger coalfield, Ordos basin, China. *International Journal of Coal Geology*, 2006, vol. 66, pp. 253–270. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2005.08.003> (accessed 15 May 2022).
 25. Dai S., Li D., Chou C.-L., Zhao L., Zhang Y., Ren D., Ma Y., Sun Y. Mineralogy and geochemistry of boehmite-rich coals: new insights from the Haerwusu surface mine, Jungar coalfield, Inner Mongolia, China. *International Journal of Coal Geology*, 2008, vol. 74, pp. 185–202. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2008.01.001> (accessed 15 May 2022).
 26. Seredin V., Dai S. Coal deposits as potential alternative sources for lanthanides and yttrium. *International Journal of Coal Geology*, 2012, vol. 94, pp. 67–93. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2011.11.001> (accessed 15 May 2022).
 27. Meytov E.S. Metallonosnost ugley [Metal content of coals]. *Ugolnaya baza Rossii. T. IV. Ugolnye basseyny i mestorozhdeniya Vostochnoy Sibiri* [Russia coal base. Vol. IV. Coal basins and deposits of Eastern Siberia]. Moscow, Geoinformmark Publ., 2001. pp. 293–301.

Received: 4 June 2022.

Information about the authors

Alexey V. Vergunov, Cand. Sc., training instructor, National Research Tomsk Polytechnic University; senior researcher, Far East Geological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences.

Sergey I. Arbuzov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University; deputy director for scientific research, Far East Geological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences.

Bulat R. Soktoev, Cand. Sc., assistant professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Sergey S. Ilenok, Cand. Sc., senior lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University.

Igor Yu. Chekryzhov, researcher, Far East Geological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences.