

На правах рукописи



ВЕРГУНОВ АЛЕКСЕЙ ВИКТОРОВИЧ

**МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ
ПИРОКЛАСТИЧЕСКОГО ВУЛКАНОГЕННОГО МАТЕРИАЛА
КАРБОНА-ПЕРМИ В УГЛЯХ КУЗНЕЦКОГО И МИНУСИНСКОГО
БАСЕЙНОВ**

Специальность 25.00.09 – Геохимия, геохимические методы поисков полезных
ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Томск – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ) в отделении геологии Инженерной школы природных ресурсов

Научный руководитель:

Арбузов Сергей Иванович

доктор геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник, профессор
отделения геологии Инженерной школы
природных ресурсов

Официальные оппоненты:

Высоцкий Сергей Викторович

доктор геолого-минералогических наук,
главный научный сотрудник, руководитель
лаборатории генетической минералогии и
петрологии ФГБУН Дальневосточный
геологический институт Дальневосточного
отделения Российской академии наук (г.
Владивосток)

Жмодик Сергей Михайлович

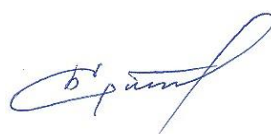
доктор геолого-минералогических наук,
главный научный сотрудник лаборатории
геохимии благородных и редких элементов
ФГБУН Институт геологии и минералогии им.
В.С. Соболева Сибирского отделения
Российской академии наук (г. Новосибирск)

Защита диссертации состоится «15» декабря 2021 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.26 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 2/5 (20 корпус, аудитория 504).

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (г. Томск, ул. Белинского, 53а) и на сайте: dis.tpu.ru

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
к.г.-м.н.



Б.Р. Соктоев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. За почти вековую историю изучения металлоносности углей выявлена большая группа разнообразных типов месторождений редких, благородных и цветных металлов в углях и углистых породах (Середин, 2004; Seredin, Finkelman, 2008; Seredin, Dai, 2012; Seredin et al., 2013; Арбузов и др., 2014; Dai et al., 2016a, 2016b; Dai et al., 2018). В настоящее время в промышленных масштабах из угля добываются только германий, литий и галлий (Середин, 2012; Lin et al., 2013; Qin et al., 2015), существовало, но прекращено производство урана (Hurst, 1981; Monnet et al., 2015) и золота (Леонов и др., 1998). Некоторые типы месторождений редких металлов в углях сформировались под влиянием субсинхронного вулканизма.

Наличие пирокластического материала отмечено в большинстве угольных бассейнов мира. А.В. Ван одним из первых с достаточной полнотой оценил исключительную роль вулканизма в формировании современного облика угленосных отложений Сибирского региона (Ван, 1967, 1968, 1972, 1973а, 1974). На примере целого ряда угольных бассейнов (Кузнецкий, Минусинский, Тунгусский), он показал глобальную роль вулканизма в формировании угленосных отложений (Ван, 1972, 2001).

Фактор синхронного вулканизма оказывает существенное влияние на формирование геохимического фона редких элементов-примесей в углях (Finkelman, 1993). Вулканогенный материал встречается в угольных пластах преимущественно в виде маломощных глинистых прослоев – тонштейнов.

Известно, что тонштейны могут быть источником высоких концентраций большой группы редких элементов-примесей в углях (Zelenski, 1985; Crowley, 1989; Hower, 1999; Dai, 2003b, 2010, 2012, 2016; Арбузов и др., 2003; Арбузов, Ершов, 2007; Arbuzov et al., 2016).

С конца XX века в отложениях Минусинского и Кузнецкого бассейнов известны редкометалльно-угольные месторождения (Горький, 1972; Середин, 1994; Арбузов и др., 2000, 2003; Арбузов и др., 2007). Высказаны предположения о том, что источником оруденения могла послужить пирокластика кислого и щелочного составов. Однако детальных исследований, направленных на изучение состава исходного пирокластического материала, не проводилось.

В связи с этим, разработка комплекса критериев идентификации пирокластического материала в угле является актуальной задачей, решение которой позволит оценить роль вулканизма в процессе формирования геохимической специализации углей, в образовании редкометалльно-угольных месторождений и выявить новые месторождения редких металлов в углях мира.

Цель работы. Изучить минералого-геохимические особенности пирокластического вулканогенного материала и вмещающих их углей Кузнецкого и Минусинского бассейнов и разработать минералого-геохимические критерии распознавания состава первичной вулканогенной пирокластики в углях.

Задачи исследования:

1. Изучить минеральный и химический состав тонштейнов и разработать комплекс минералого-геохимических критериев для идентификации первичного состава вулканогенной пирокластики;
2. Реконструировать исходный состав вулканогенной пирокластики из которой сформировались тонштейны по минералого-геохимическим критериям;
3. Оценить влияние пирокластического материала, сформировавшего тонштейны, на химический состав вмещающих их углей;
4. Выделить в углях группы химических элементов, источником которых послужил пирокластический материал различного состава;
5. Установить источники вулканогенной пирокластики, сформировавшей тонштейны;
6. Оценить перспективы металлоносности углей Кузнецкого и Минусинского бассейнов, обусловленной влиянием вулканогенной пирокластики.

Фактический материал и методы исследования. В основу работы положены результаты исследования более 800 проб угля, внутрипластовых вулканогенных прослоев и углевмещающих пород, отобранных в процессе полевых работ в Минусинском и Кузнецком угольных бассейнах, при непосредственном участии автора.

Отобранные пробы угля озолялись с определением зольности и влажности. Озоление проб проводилось при 800 ± 15 °С в соответствии с ГОСТ 11022-95 в научно-исследовательской лаборатории по комплексному использованию горючих ископаемых НИ ТПУ (исполнитель – С.Г. Маслов).

При выполнении исследования применялся комплекс современных методов нейтронно-активационного анализа (ИНАА), масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) и атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-АЭС).

ИНАА выполнен в ядерно-геохимической лаборатории на исследовательском ядерном реакторе ИРТ-Т ТПУ (аналитик – А.Ф. Судыко). Определение содержания химических элементов в пробах осуществлялось без предварительного концентрирования для исключения возможности уменьшения концентрации элементов при озолении.

Исследования методами ИСП-МС и ИСП-АЭС произведены в аналитическом центре Дальневосточного геологического института ДВО РАН (исполнитель – Н.В. Зарубина) и в ООО «Химико-аналитический центр «Плазма» (директор – Н.В. Федюнина).

Определение содержания Hg в образцах выполнено методом беспламенной абсорбции на приборе РА-915+ с пиролитической приставкой ПИРО-915 (метод пиролиза).

Для изучения структурно-текстурных особенностей, минерального состава, характера органических остатков неугольных прослоев применялся петрографический анализ.

Исследование состава минерального вещества породных прослоев, в том числе глинистых минералов, произведено методом рентгенофазового анализа

(РФА). РФА был проведен на дифрактометре Bruker D2 Phaser в МИНОЦ «Урановая геология» в отделении геологии ТПУ (исполнитель – А.В. Вергунов) и в лаборатории седиментологии АО «ТомскНИПИнефть» с использованием рентгеновского дифрактометра RIGAKU Ultima IV с реализацией съемки рентгенограмм в геометрии Брегга-Брентано (исполнитель – Ю.М. Лопушняк).

Изучение микроминеральных форм элементов в углях и золах углей производилось на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Hitachi S-3400N в МИНОЦ «Урановая геология» ТПУ. Состав включений устанавливался с помощью энерго-дисперсионного спектрометра Bruker XFlash 4010/5010. Исследование проб выполнялось в режиме низкого вакуума с детектором обратно-рассеянных электронов.

Защищаемые положения:

1. Установлено, что тонштейны Минусинского и Кузнецкого бассейнов сформировались из риолитового, андезитового и щелочно-базитового вулканогенного пеплового материала. Разработан комплекс минералого-геохимических критериев идентификации первичного состава преобразованной в тонштейны вулканогенной пирокластике ($\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, диаграмма Nb/Y–Zr/TiO₂, графики распределения РЗЭ, содержание редких и радиоактивных элементов).
2. В процессе преобразования вулканогенной пирокластике при торфообразовании и в угольном пласте происходит интенсивная миграция, перераспределение и изменение форм нахождения большинства химических элементов, в том числе слабо подвижных в зоне гипергенеза Ti, Zr, Nb, Ta, РЗЭ, Th.
3. Пирокластический материал, сформировавший тонштейны Минусинского и Кузнецкого бассейнов, оказал существенное влияние на редкометалльную геохимическую специализацию углей. С вулканогенной пирокластикой кислого и щелочного состава в Минусинском и Кузнецком бассейнах связано комплексное Nb, Ta, Zr, Hf, РЗЭ, Ga, Th оруденение.

Научная новизна:

Установлено, что тонштейны Кузнецкого и Минусинского бассейнов имеют отличительные минералогические и геохимические особенности, на основе которых становится возможна их идентификация как преобразованной вулканогенной пирокластике.

На основе предложенного комплекса методов определен состав исходного пеплового материала, послужившего источником для формирования тонштейнов. Среди изученных тонштейнов преобладают продукты преобразования кислой пирокластике 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.

Установлено, что различный состав исходного пирокластического материала проявляется не только в особенностях химического и минерального состава образованных из него тонштейнов, но и в формировании в углях на границе с тонштейнами специфических геохимических ассоциаций.

С вулканогенной пирокластикой, выявленной в углях Минусинского и Кузнецкого бассейнов связано комплексное Nb, Ta, Zr, Hf, PЗЭ, Ga, U, Th оруденение. Его следы прослеживаются в разновозрастных отложениях в виде породных прослоев. Данные породные прослои могут служить в качестве реперов для межбассейновой корреляции углей.

Теоретическая и практическая значимость работы:

Существующие методы распознавания тонштейнов в пластах не всегда позволяют надежно идентифицировать исходный состав и природу изучаемых прослоев. Главной причиной этого является практически полное изменение исходного вулканогенного материала, из которого сформировался прослой.

Разработка критериев минералогического и геохимического распознавания прослоев пирокластического вулканогенного материала (тонштейнов), позволяет упростить процедуру их идентификации. Данный метод позволяет проводить корреляцию угольных пластов Кузнецкого и Минусинского бассейнов как внутри бассейнов, так и между собой, а также выяснить эволюцию магматизма, субсинхронного процессу торфообразования на территории Сибирского региона.

Достоверность защищаемых положений обусловлена представительным количеством проб для статистических расчетов, применением высокочувствительных аналитических методов элементного анализа (ИНАА, ИСП-МС), выполненного в аккредитованных лабораториях, а также применением современных методик прямого анализа минеральных форм нахождения элементов (рентгенофазовый анализ, сканирующая электронная микроскопия).

Апробация работы и публикации. Основные положения и результаты докладывались на Международных симпозиумах студентов и молодых ученых «Проблемы геологии и освоения недр» (Томск, 2016-2020 гг.), Российской молодежной научно-практической Школе с международным участием «Новое в познании процессов рудообразования» (Москва, 2016, 2018, 2019), X Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Геология в развивающемся мире» (Пермь, 2017), IX Всероссийской конференции с международным участием «Петрология магматических и метаморфических комплексов» (Томск, 2017), Всероссийской конференции молодых ученых «Современные проблемы геохимии» (Иркутск, 2018), XIV Международной научно-практической конференции «Новые идеи в науках о Земле» (Москва, 2019), Всероссийской научной конференции «Геохимия нефти и газа, нефтематеринских пород, угля и горючих сланцев» (Сыктывкар, 2019), 7 Международной конференции «Крупные изверженные провинции в истории Земли» (Томск, 2019), II Молодежной научно-образовательной конференции ЦНИГРИ: «Минерально-сырьевая база алмазов, благородных и цветных металлов – от прогноза к добыче» (Москва, 2021).

Основные положения диссертационной работы изложены в 21 публикации, в том числе: 5 статей в журналах перечня ВАК, из них 5 индексируемые в Scopus и Web of Science.

В 2020 году статья «Geochemistry, mineralogy and genesis of rare metal (Nb-Ta-Zr-Hf-Y-REE-Ga) coals of the seam XI in the south of Kuznetsk Basin, Russia»

отмечена премией Дала Суэйна как лучшая опубликованная работа в области неорганической или органической геохимии и/или минералогии угля или нефтематеринских пород (2020 TSOP Dal Swaine Award).

Работа выполнялась в рамках реализации гранта РФФИ «Минералого-геохимическая идентификация продуктов эксплозивного вулканизма в углях карбон-пермского возраста Минусинского и Кузнецкого угольных бассейнов» (16-05-00405А) 2016-2017 гг., гранта РФФИ «Механизмы накопления ценных элементов в углях и генезис редкометалльно-угольных месторождений разновозрастных осадочных бассейнов (Южная Сибирь, юг Дальнего Востока России и Северо-западный Китай)» (16-55-53122 ГФЕН_а) 2016-2017 гг., гранта РНФ «Теоретическое и эмпирическое обоснование условий и факторов накопления ценных и токсичных элементов-примесей в углях, прогнозно-поисковые критерии металлоносных углей и оценка металлоносности угольных бассейнов азиатской части России» (18-17-00004), гранта РФФИ «Аспиранты» «Разработка критериев минералого-геохимической идентификации пирокластического вулканогенного материала в угленосных отложениях Кузнецкого и Минусинского бассейнов» (19-35-90010).

Личный вклад автора состоял в опробовании и изучении тонштейнов и вмещающих их углей Минусинского и Кузнецкого бассейнов, в обработке и подготовке проб для аналитических исследований, составлении баз данных элементного состава пород и углей, проведении рентгенофазового анализа, электронно-микроскопическом изучении образцов. Также автором на основании полученных аналитических данных было выполнено построение графиков, диаграмм, разрезов и карт. Автором выполнен анализ полученных результатов, их интерпретация и сформулированы итоги исследований в виде защищаемых положений.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность научному руководителю, доктору геолого-минералогических наук, профессору отделения геологии ИШПР ТПУ Сергею Ивановичу Арбузову за научное сопровождение и методическую помощь на всем протяжении выполнения работы.

За содействие в полевых работах автор признателен главному геологу ОАО «Разрез Аршановский» В.М. Соболенко (г. Абакан), главному геологу ПАО «Угольная компания «Южный Кузбасс»» В.А. Иванову (г. Междуреченск).

За ценные советы, консультации и конструктивные замечания автор благодарен д.г.-м.н., профессорам Л.П. Рихванову, Е.Г. Языкову, к.г.-м.н. В.А. Домаренко, Б.Р. Соктоеву, С.С. Ильенку. Автор выражает благодарность д.г.-м.н., Э.В. Сокол за конструктивные замечания и консультации.

Автор выражает благодарность сотрудникам аналитических лабораторий А.Ф. Судыко, Л.В. Богутской, Н.В. Зарубиной, Н.В. Федюниной за проведение большого объема аналитических исследований, С.Г. Маслову и В.С. Архипову за проведение работ по озолению углей и определению зольности.

Структура и объем работы. Диссертация объемом 123 страницы состоит из введения, 7 глав, заключения и списка литературы из 182 источников. Работа содержит 41 рисунок и 14 таблиц.

Основное содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы и проведенных исследований. Определены цель и задачи диссертации, показаны основные результаты, представлены научная новизна и практическая значимость, обозначен личный вклад автора и апробация работы.

В **первой** главе представлен краткий обзор истории исследования пирокластического материала в углях. **Вторая** глава содержит сведения о методике пробоотбора, пробоподготовки и аналитических методах исследования. В **третьей** главе дается краткая геологическая характеристика Минусинского и Кузнецкого бассейнов. В **четвертой** главе рассматриваются минералогическо-геохимические особенности тонштейнов Кузнецкого и Минусинского бассейнов. В **пятой** главе рассматривается комплекс критериев для идентификации первичного состава преобразованной пирокластики. В **шестой** главе дается геохимическая характеристика углей, на которые оказал влияние пирокластический материал. В **седьмой** главе проводится корреляция угольных пластов и обсуждается вероятный источник пирокластического материала. В **заключении** перечислены основные результаты и выводы диссертационной работы.

ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ

Первое защищаемое положение. Установлено, что тонштейны Минусинского и Кузнецкого бассейнов сформировались из риолитового, андезитового и щелочно-базитового вулканогенного пеплового материала. Разработан комплекс минералогическо-геохимических критериев идентификации первичного состава преобразованной в тонштейны вулканогенной пирокластики ($\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, диаграмма Nb/Y–Zr/TiO₂, графики распределения РЗЭ, содержание редких и радиоактивных элементов).

Комплекс критериев, разработанный для идентификации преобразованной пирокластики в углях Минусинского и Кузнецкого бассейнов, включает в себя полевую диагностику, изучение минерального состава измененного пеплового материала, а также его геохимических особенностей.

Полевая диагностика тонштейнов

Все изученные тонштейны хорошо диагностируются визуально. Они характеризуются небольшой мощностью, выдержанной по простиранию. Мощность прослоев обычно составляет 1-5 см. Границы прослоев четкие, контрастные, лишь в случае перекрытия их алевролитом отмечается постепенный переход. Тонштейны отчетливо выделяются светлой окраской на фоне угля, что отличает их от терригенных породных прослоев, обычно окрашенных в темные цвета за счет органического вещества (рис. 1).



Рисунок 1. Тонштейны в угольном пласте

Минеральный состав тонштейнов

Исследования показали, что изученные тонштейны имеют преимущественно каолиновый состав. Однако встречаются как практически мономинеральные каолиновые породы (70-100 % каолинита), так и тонштейны смешанного состава. Каолинит в изученных образцах встречается в нескольких модификациях: 1 – в виде кристаллов; 2 – в виде шарообразных или эллиптических зерен (крупинок); 3 – в виде псевдоморфоз по слюдам и полевым шпатам; 4 – в виде скрытокристаллической основной массы. Характерной особенностью тонштейнов, отличающей их от породных каолиновых прослоев терригенной природы, является распространение в них червеобразно изогнутых агрегатов каолинита – вермикул (рис. 2).

Второстепенными минералами являются фосфаты (апатит и гояцит), кварц, кристобалит, полевые шпаты. Эпигенетические минералы, наложенные на ранее сформированные каолиновые тонштейны, представлены карбонатами, чаще сидеритом, доломитом, реже кальцитом.

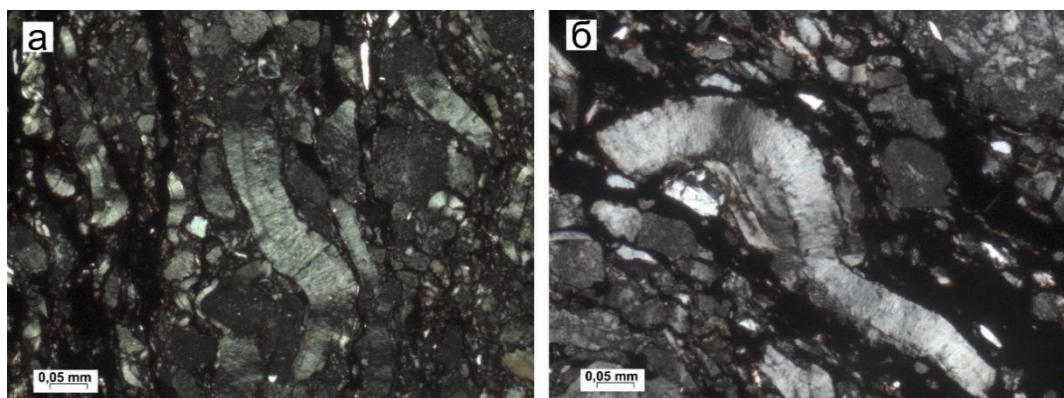


Рисунок 2. Изогнутые агрегаты каолинита (вермикулы)

Об апопелловом генезисе тонштейнов свидетельствуют реликтовые структуры и типы псевдоморфных минералов. Однако минеральный состав тонштейнов не позволяет реставрировать исходный состав пеплового материала из-за практически полного преобразования в агрессивной среде торфяного болота.

Традиционно для целей идентификации первичного состава пирокластического материала тонштейнов используются химические элементы, относительно инертные в зоне гипергенеза, такие как Al, Ti, Zr, Y, Nb. Этот ряд может быть также дополнен Sc, Ta, Hf, Th и U.

Критерии идентификации пирокластического материала в углях

Титановый модуль

Одним из типовых коэффициентов является титановый модуль ($\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$). Согласно обзору Я.Э. Юдовича и М.П. Кетрис (2000), отношение TiO_2 к Al_2O_3 является одним из достоверных показателей вклада пирокластики в формирование отложений, в особенности применительно к кислым вулканическим пеплам.

Как показали исследования Д.А. Спирса и Р. Канариса-Сотириу (1979), $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ отношение менее 0,02 характерно для кислой (риолитовой) пирокластики, более 0,06 – для основной. Промежуточные значения характерны для пирокластики среднего и щелочного состава. Данный модуль с большой достоверностью помогает диагностировать состав пирокластического материала сформировавшего тонштейн, что подтверждается многочисленными работами (Addison et al., 1983; Zhou et al., 2000; Burger et al., 2002; Dai et al., 2011, 2017; Zou et al., 2014 и т.д.).

Значение титанового модуля для изученных тонштейнов Бейского и Черногорского месторождений Минусинского бассейна изменяется в широких пределах (0,005-0,081). Однако большинство прослоев характеризуется низким значением отношения TiO_2 к Al_2O_3 варьирующем в диапазоне от 0,005 до 0,048.

Величина титанового модуля для тонштейнов Изыхского месторождения Минусинского бассейна изменяется в пределах 0,007-0,053. Отношение TiO_2 к Al_2O_3 для тонштейнов Кузнецкого бассейна варьирует в пределах 0,014-0,064.

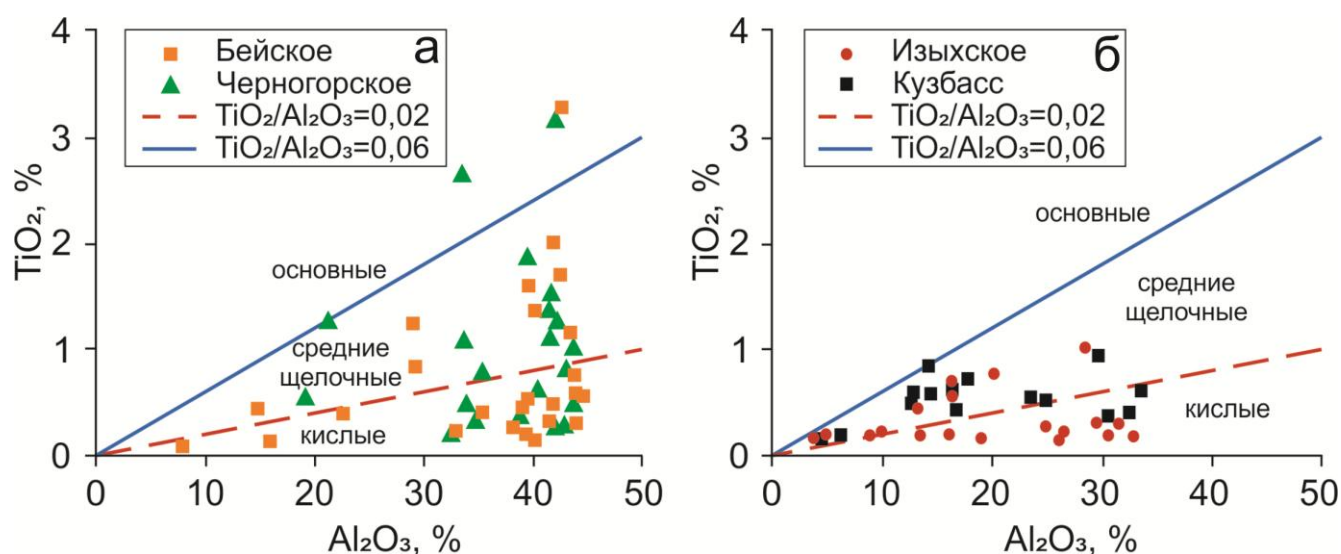


Рисунок 3. Отношение TiO_2 к Al_2O_3 для изученных тонштейнов: а – карбонового возраста; б – пермского возраста

Исследования показывают, что титан не остается инертным в процессе преобразования вулканического пепла в условиях болотной среды. Он становится подвижным и образует минеральные фазы в виде оторочек вокруг включений органического вещества.

Классификационная диаграмма Винчестера и Флойда

Диаграмма Дж.А. Винчестера и Р.А. Флойда (Winchester, Floyd, 1977), в основе которой лежит отношение Zr/TiO_2 к Nb/Y , широко используется для восстановления состава преобразованного вулканического пепла (Dai et al., 2011; Spears, 2012; Arbuzov et al., 2016; Wang et al., 2016 и др.). Впервые к тонштейнам данный график был применен Д.А. Спирсом и П.М.Д. Даффом (Spears, Duff, 1984).

Применение данной диаграммы ограничено различной подвижностью элементов, которые положены в ее основу. Исследования показали значительный вынос циркония и ниобия из пепловых горизонтов в процессе преобразования исходного минерального вещества практически до мономинерального каолинитового состава. При малой мощности тонштейнов (1-5 см) в золе угля на контакте с прослоем содержание циркония достигает нескольких процентов, что многократно превышает его концентрацию в золе угля на удалении от тонштейна. Значительное накопление циркония на контакте с тонштейном, отмечается исследователями, изучающими тонштейны мира (Hower, 1999; Arbuzov et al., 2016). Титан при этом, несмотря на перераспределение внутри тонштейна, в целом мигрирует слабее. На это указывает наличие его аутигенных минералов в тонштейнах или на непосредственном контакте тонштейна и угля. При этом в углях и золах углей на контакте с тонштейном контрастные зоны обогащения также встречаются, но они значительно менее контрастны, чем циркониевые. Подобные соотношения характерны для ниобия и иттрия. Зоны обогащения угля на контакте с тонштейном более контрастны для ниобия и менее – для иттрия. Это приводит к искажению реального соотношения элементов. Скорректировать результаты сложно, так как невозможно учесть реальную массу вынесенного из прослоя вещества. Грубые корректировки показывают на смещение результатов интерпретации в сторону возрастания щелочности и, в меньшей степени, кислотности исходных пород. Следовательно, корректное использование диаграмм возможно только совместно с другими критериями.

Тонштейны Бейского и Черногорского месторождений Минусинского бассейна преимущественно располагаются на полях риолитов, риодацитов и андезитов, редко андезибазальтов, трахиандезитов и щелочных базальтов.

Тонштейны Изыхского месторождения Минусинского бассейна в большинстве случаев занимают поля риолитов и риодацитов. Тонштейны Кузнецкого бассейна располагаются в полях соответствующих риодацитам, андезитам, редко трахиандезитам и трахитам.

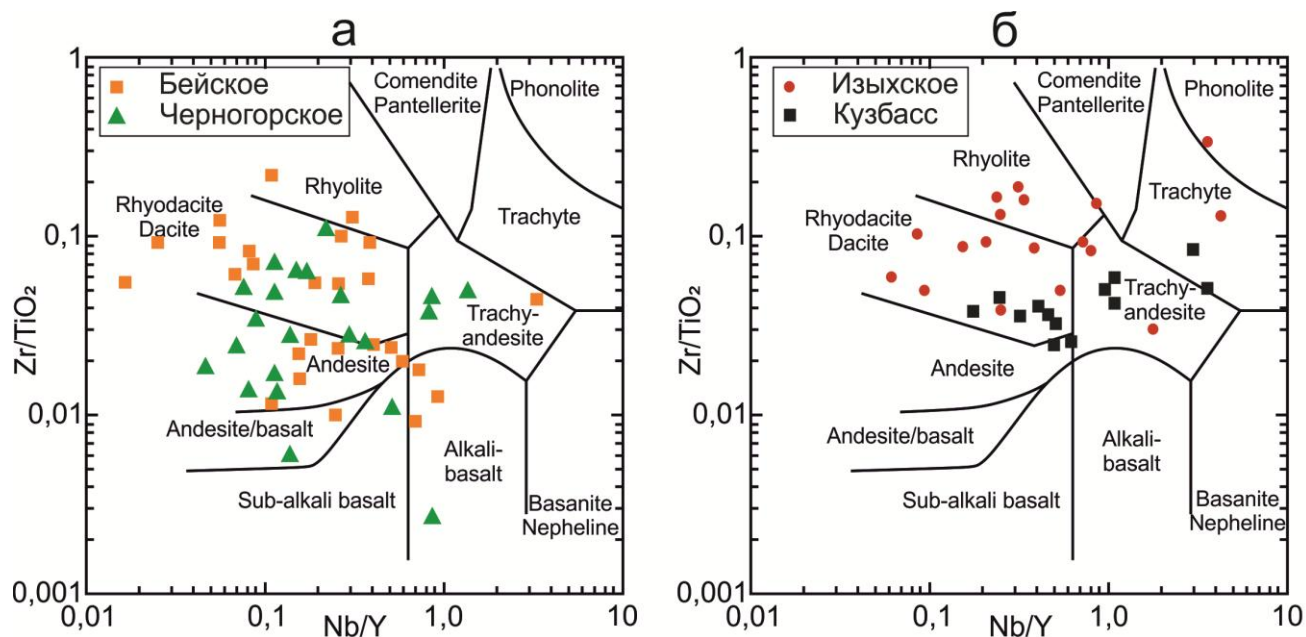


Рисунок 4. Положение тонштейнов: а – карбонового возраста; б – пермского возраста, на $Zr/TiO_2 - Nb/Y$ диаграмме (Winchester, Floyd, 1977)

Радиоактивные элементы

Определенную информацию несут радиоактивные элементы. В условиях восстановительной среды торфяного болота уран восстанавливается до валентности 4+ и довольно слабо мигрирует. Торий, как элемент-гидролизат, в этой среде мигрирует также слабо. Миграция U и Th в этой геохимической обстановке возможна, прежде всего, за счет переноса в составе органо-минеральных комплексов (Арбузов и др., 2012). Следовательно, высокие их содержания могут служить индикаторами пеплов кислого и щелочного состава.

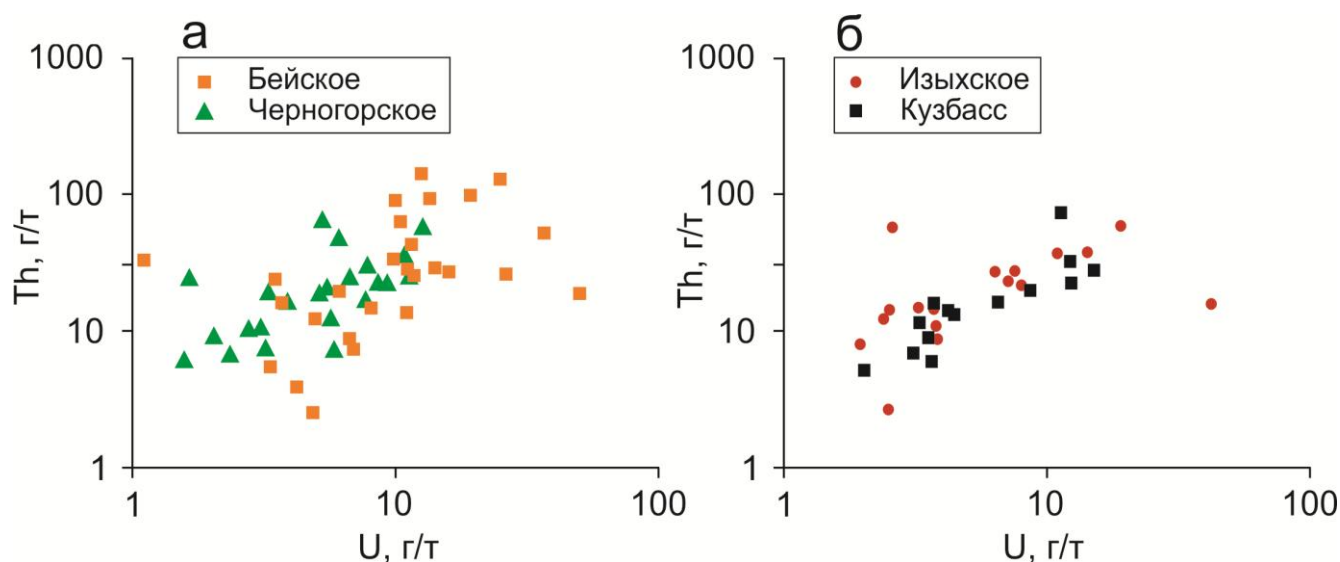


Рисунок 5. Положение тонштейнов: а – карбонового возраста; б – пермского возраста, в полях U-Th

С высокой концентрацией тория связана повышенная радиоактивность прослоев. Она регистрируется при гамма-каротаже, а также при применении малогабаритного радиометрического оборудования в горных выработках.

Тонштейны с низким содержанием тория во всех случаях представлены разностями основного или среднего состава. Наличие высокоторийевых разностей тонштейнов указывает на проявление кислого или щелочного вулканизма (табл. 1).

Графики распределения РЗЭ

Редкоземельные элементы широко используются в качестве геохимических индикаторов для пирокластического материала в угле (Hower et al., 1999a, Zhou et al., 2000; Dai et al., 2011; Arbuzov et al., 2016). Это объясняется их предсказуемым поведением при различных геохимических процессах (Van der Flier-Keller, 1993; Bau et al., 1996, 2014; Seredin, Dai, 2012).

На рис. 6 в качестве примера приведены спектры нормированных на хондрит содержаний РЗЭ в тонштейнах. Спектры для большинства изученных образцов характеризуются отчетливой отрицательной европиевой аномалией. На кривых распределения РЗЭ отмечается преобладание легких РЗЭ над тяжелыми. Подобные графики распределения с отрицательной европиевой аномалией характерны для пирокластики кислого состава (рис. 6а). На графиках распределения РЗЭ для тонштейнов образовавшихся с участием кислой пирокластики щелочного ряда сохраняется схожий тренд, что и для кислых нормального ряда, но с менее выраженной европиевой аномалией (рис. 6б).

Среди изученных тонштейнов выделены разности, спектры которых имеют сложную конфигурацию со слабовыраженной отрицательной Eu аномалией (рис. 6в). Такие спектры распределения могут свидетельствовать о вкладе пирокластического материала среднего состава. Спектры распределения РЗЭ для разностей основного состава отрицательной аномалией не обладают.

На основе минералого-геохимических критериев было установлено, что тонштейны Кузнецкого и Минусинского бассейнов сформировались преимущественно из риолитового, андезитового и щелочно-базитового пирокластического материала.

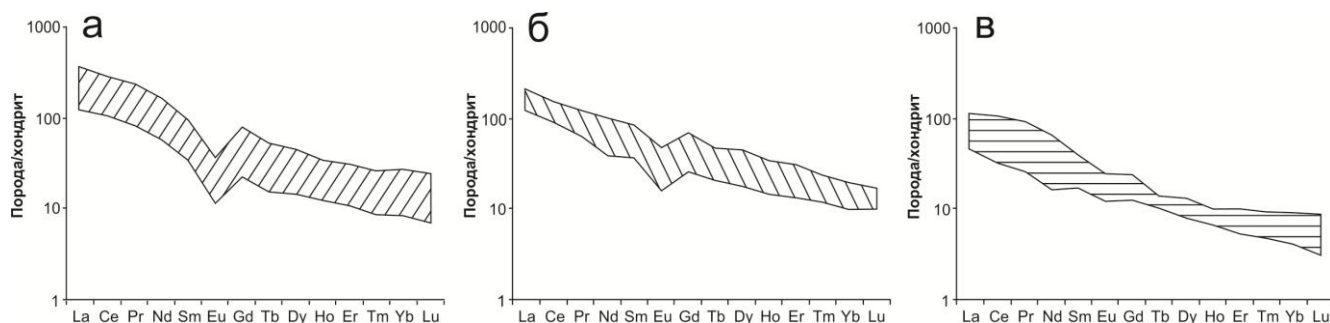


Рисунок 6. Распределение РЗЭ в тонштейнах: а – кислого состава; б – кислого состава щелочного ряда; в – основного и среднего составов. Нормировано на хондрит (McDonough, Sun, 1995)

Таблица 1. Химический состав тонштейнов Минусинского бассейна, образованных из пирокластики различного состава (окислы – в %, микроэлементы – в г/т)

Состав пород	Кислые		Средние		Основные	
Ряд	нормальный	щелочной	нормальный	щелочной	нормальный	щелочной
Номер пробы	Дв-12-02	Дв-17-02	М-22-18	Ар-73-18	Ар-25-17	Ар-6-18
SiO ₂	28,0	39,0	37,7	31,7	38,5	23,4
TiO ₂	0,16	0,86	1,16	0,87	2,62	0,88
Al ₂ O ₃	22,4	31,1	28,8	27,5	31,4	13,9
Fe ₂ O ₃	2,05	0,27	2,52	0,60	0,40	0,28
MnO	0,053	0,010	0,011	0,003	0,007	0,001
CaO	0,13	1,51	0,30	0,49	0,24	0,14
MgO	0,47	0,15	0,25	0,14	0,17	0,08
K ₂ O	0,05	0,11	0,30	0,21	0,15	0,08
Na ₂ O	0,08	0,31	0,16	0,06	0,08	0,04
P ₂ O ₅	0,05	1,18	0,12	2,35	0,12	0,04
Ппп	46,5	25,3	28,4	34,7	25,9	61,0
Сумма	99,9	99,7	99,6	98,6	99,6	99,8
A ^d , %	53,1	75,4	71,9	65,8	73,8	35,6
TiO ₂ /Al ₂ O ₃	0,007	0,028	0,040	0,032	0,084	0,063
Be	1,47	1,17	0,81	0,88	1,00	2,81
Sc	1,19	3,83	5,80	4,90	17,7	20,0
V	6,20	7,97	31,7	7,73	37,4	70,9
Cr	35,5	21,5	20,5	3,53	26,7	29,1
Co	16,6	5,90	1,85	8,70	8,43	6,57
Ni	41,2	76,6	8,77	45,2	8,97	17,4
Cu	–	–	14,7	17,3	49,5	49,0
Zn	33,2	21,5	134	118	94,8	14,4
Ga	45,4	48,4	43,8	36,5	40,1	62,6
Rb	3,17	3,46	13,6	6,28	4,48	4,94
Sr	98,2	865	94,3	13880	158	307
Y	8,45	48,9	28,4	36,4	16,2	42,0
Zr	206	126	162	91,8	141	203
Nb	1,86	5,55	13,2	3,90	10,8	46,4
Mo	2,37	1,83	5,01	1,13	–	4,11
Cd	0,52	0,68	1,48	0,79	0,59	1,02
Sn	9,77	5,63	1,39	4,05	4,33	7,32
Cs	0,17	0,20	0,38	0,28	0,63	0,22
Ba	162	614	264	4894	527	555
La	8,62	65,7	55,2	24,7	18,1	88,6
Ce	26,7	118	136	47,2	42,4	177
Pr	3,11	13,1	16,7	5,30	5,44	18,8
Nd	14,8	46,7	59,5	18,0	23,7	66,2
Sm	4,15	11,1	11,4	6,59	4,12	11,29
Eu	0,54	1,86	2,84	1,85	1,10	1,80
Gd	3,05	11,9	9,63	6,99	3,99	11,7
Tb	0,45	1,69	1,04	1,07	0,61	1,22
Dy	2,49	7,63	6,03	5,06	3,59	7,40
Ho	0,32	1,63	1,03	0,90	0,69	1,42
Er	1,11	3,81	2,76	2,16	2,36	4,20
Tm	0,16	0,49	0,40	0,27	0,30	0,64
Yb	1,05	2,76	2,64	1,62	2,02	4,05
Lu	0,15	0,45	0,31	0,18	0,31	0,52
Hf	6,78	3,72	4,24	2,21	4,71	6,15
Ta	3,39	2,12	1,32	1,70	1,22	5,74
W	1,15	3,79	1,43	0,65	3,63	6,38
Pb	29,3	19,7	8,94	24,4	44,7	69,9
Th	68,3	26,2	14,9	31,7	8,79	55,7
U	5,16	1,73	25,2	3,18	6,71	12,5

* – содержание микроэлементов пересчитано на безугольную массу

Для тонштейнов, образовавшихся из пирокластики кислого состава, отличительными особенностями являются: высокая концентрация тория, низкие значения титанового модуля, контрастная отрицательная европиевая аномалия.

Партинги, сформированные из пеплов среднего и основного составов, характеризуются низкими концентрациями тория, повышенными значениями титанового модуля. Графики нормированных на хондрит РЗЭ не имеют Eu аномалии. В составе разностей основного состава наблюдается высокая концентрация Sc и V.

О присутствии пирокластики щелочного ряда свидетельствует высокая концентрация РЗЭ, Y, Zr, Nb, Hf, Ta и Th в составе тонштейнов.

Второе защищаемое положение. В процессе преобразования вулканогенной пирокластики при торфообразовании и в угольном пласте происходит интенсивная миграция, перераспределение и изменение форм нахождения большинства химических элементов, в том числе слабо подвижных в зоне гипергенеза Ti, Zr, Nb, Ta, РЗЭ, Th.

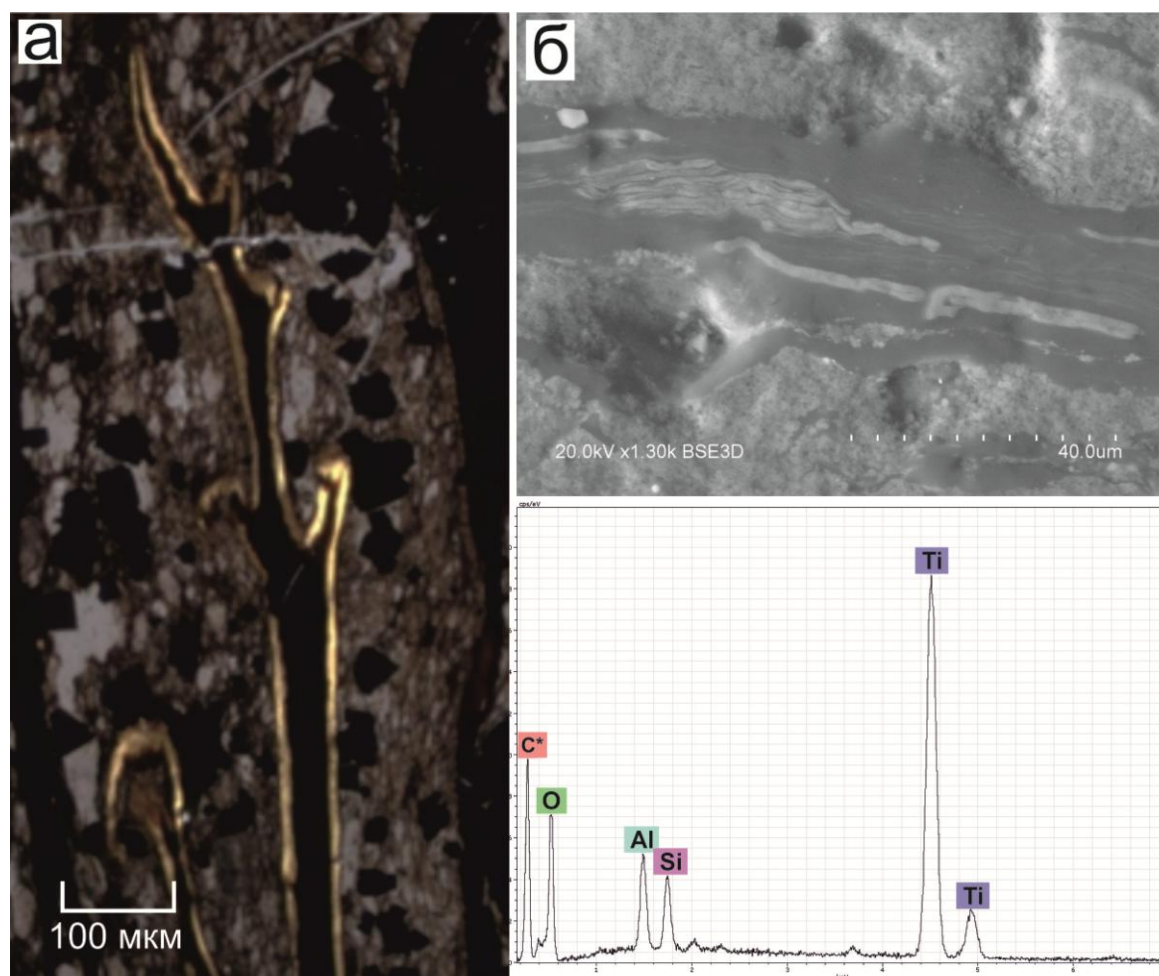


Рисунок 7. Оторочка титаносодержащей фазы вокруг органического вещества. Изображение получено с помощью: а – оптического микроскопа, б – электронного микроскопа

Основной трудностью в диагностике исходного состава вулканогенной пирокластики 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 пирокластики.

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. Новообразованные минеральные фазы титана представляют собой оторочки, сформированные вокруг органического вещества, часто на контакте тонштейна с углем (рис. 7). Однако подобных образований не обнаружено при исследовании угля, вмещающего тонштейны, что свидетельствует о минимальном выносе титана за пределы глинистых прослоев.

Периодически в тонштейнах выявляются корродированные кавернозные кристаллы цирконов, что свидетельствует об их разрушении в процессе перераспределения вещества (рис. 8). На этот процесс также указывают аномально высокие концентрации циркония в золе угля находящего выше и ниже тонштейнов. Зона обогащения золы углей, вмещающих тонштейны, не ограничивается углем непосредственного контакта с прослоем, а прослеживается на некотором удалении (рис. 9).

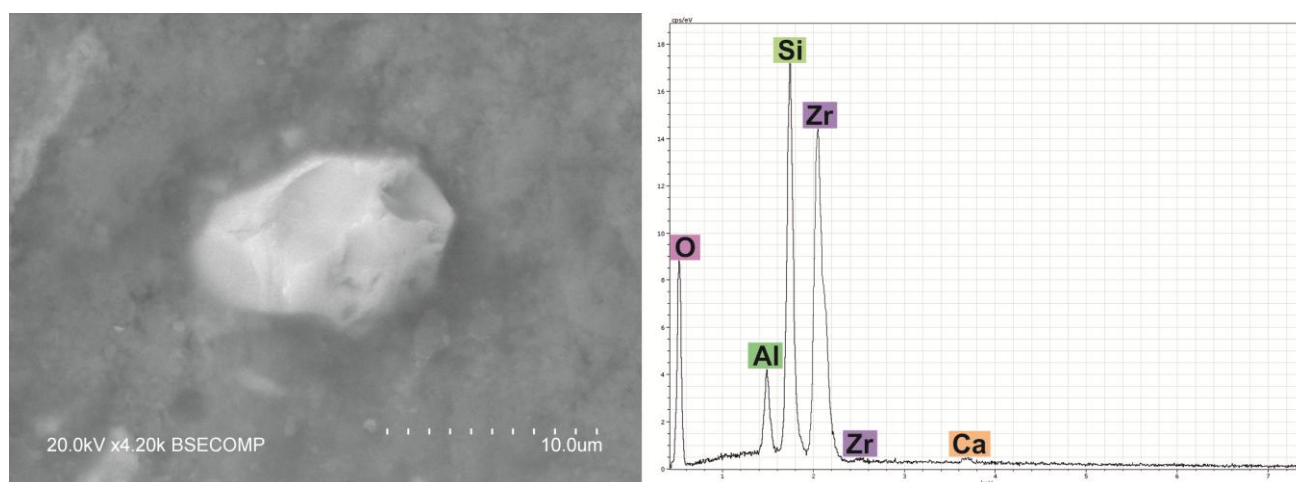


Рисунок 8. Кавернозный кристалл циркона в тонштейне

Гафний в условиях палеоболота также подвижен. Схема его распределения в разрезах угольных пластов, где присутствуют тонштейны, такая же, как для циркония. Цирконий-гафниевое отношение в золе угля выше, чем в тонштейне. Это указывает на меньшую подвижность гафния, нежели циркония в данной обстановке.

Распределение ниобия в тонштейнах и вмещающем угле такое же, как и циркония с гафнием (рис. 9). Для тантала отмечаются высокие концентрации в золе угля на контакте с тонштейнами. Однако аномалии тантала имеют меньшую распространенность по мощности (рис. 9). Ниобий-танталовое отношение в

тонштейнах имеет меньшую величину, чем в золе приконтактового угля. Это свидетельствует о более высокой подвижности ниобия по сравнению с танталом в процессе преобразования пеплового материала.

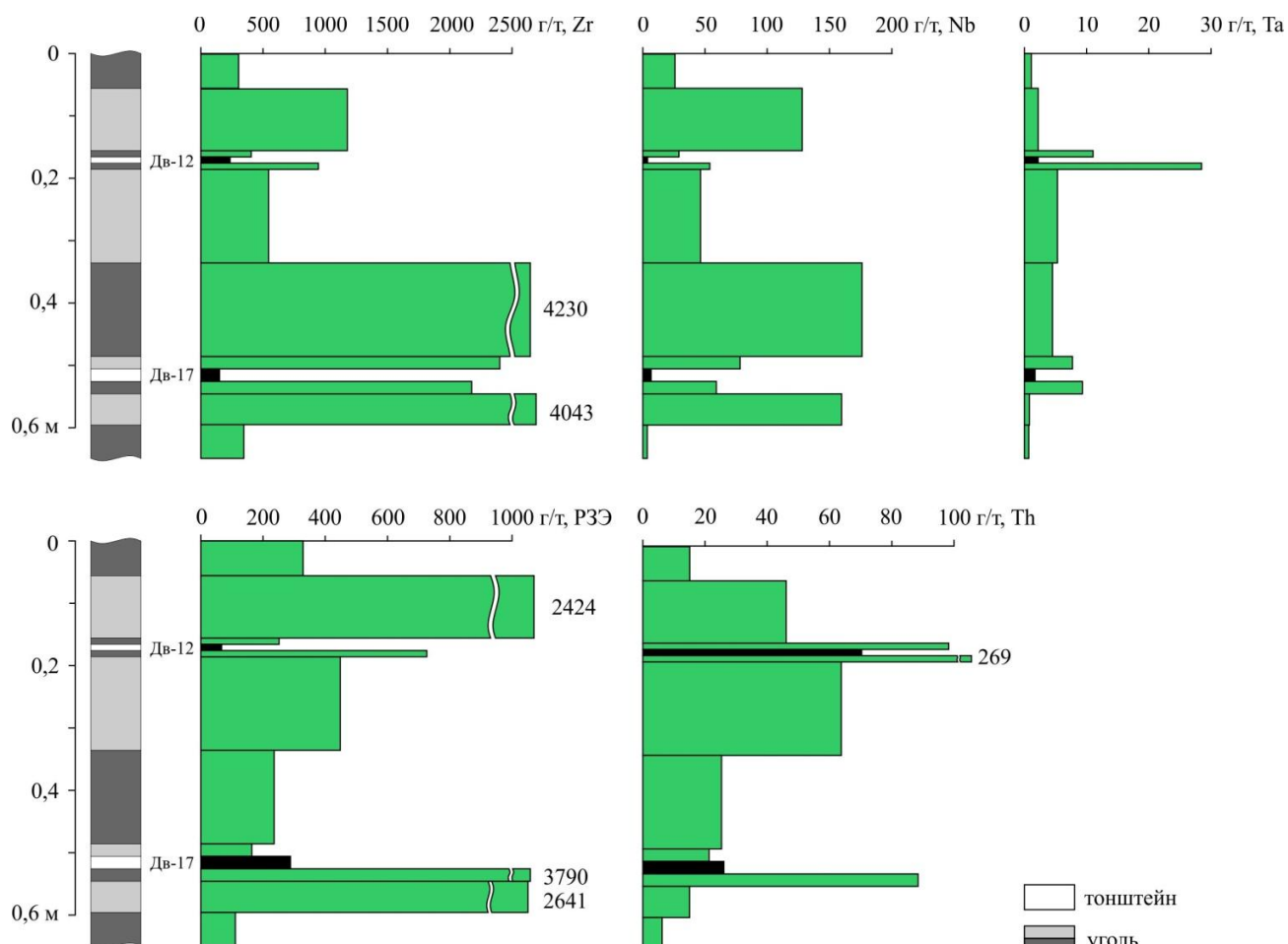


Рисунок 9. Распределение Zr, Nb, Ta, P3Э, Th в золе угля в вертикальном разрезе пласта Двухаршинный

На контакте с тонштейнами также отмечаются высокие концентрации P3Э. Зона обогащения P3Э зола углей, на которую оказал влияние пирокластический материал, имеет большую мощность, чем для Zr и Nb (рис. 9). Это может быть обусловлено большей подвижностью P3Э в водах зоны гипергенеза. При электронно-микроскопических исследованиях в тонштейнах часто встречаются фосфаты P3Э – монацит, часто со следами растворения. А в угле на контакте с прослоями диагностируются агрегаты фосфатов P3Э в виде прожилков.

Распределение тория близко к распределению других элементов-гидролизатов. Часто зона обогащения зола углей над и под тонштейном незначительна и ограничивается приконтактовой зоной (рис. 9).

Третье защищаемое положение. Пирокластический материал, сформировавший тонштейны Минусинского и Кузнецкого бассейна, оказал существенное влияние на редкометалльную геохимическую специализацию углей. С вулканогенной пирокластикой кислого и щелочного состава в

Минусинском и Кузнецком бассейнах связано комплексное Nb, Ta, Zr, Hf, PЗЭ, Ga, Th оруденение.

Доказано значительное влияние пирокластического материала на геохимию углей Сибири (Арбузов и др., 2003, 2007). В угольных пластах Минусинского бассейна, которые характеризуются отчетливо выраженной литофильной редкометалльной специализацией, было отмечено наличие пирокластического материала в виде тонштейнов.

Угольные пласты Черногорского месторождения, такие как Гигант, Мощный, Великан, Двухаршинный, характеризуются наличием тонштейнов, которые сформировались из пирокластике преимущественно кислого и щелочного состава. В угольных пластах Бейского месторождения (19, 17, 16) также диагностированы тонштейны кислого и щелочного состава. Исходный пепловый материал, сформировавший эти прослои, оказал существенное влияние на геохимию данных пластов.

В угольных пластах Изыхского месторождения, таких как XXIII, XXVIII и XXX, выявлены значительные концентрации редких металлов. В данных пластах также диагностировано наличие тонштейнов, которые сформировались из пеплов кислого состава щелочного ряда.

В пластах угля Кузнецкого бассейна (Горелый, VI, IV-V), в составе которых отмечались контрастные аномалии редких элементов-примесей, также было диагностировано наличие породных прослоев, генезис которых связан с пирокластическим материалом. Комплекс элементов, которыми обогащены тонштейны и вмещающие их угли, свидетельствует о преимущественно щелочном составе исходного пеплового материала.

В конце XX века в Кузнецком и Минусинском угольном бассейне было обнаружено редкометалльно-угольное оруденение (Середин, 1994; Арбузов и др., 2000, 2003; Арбузов, Ершов, 2007).

В Кузбассе такое оруденение было выявлено на юге в пласте XI в отложениях кемеровской свиты. Его генезис долгое время считался противоречивым: от сингенетичного гидрогенного (Середин, 1994) до вулканогенного (Арбузов и др., 2003; Арбузов, Ершов, 2007; Seredin, Finkelman, 2008) и вулканогенно-гидротермального (Середин, 1994; Zhao, 2017a, 2017b, 2017c).

В Минусинском бассейне в пласте XXX изыхской свиты Изыхского месторождения было выявлено специфическое комплексное редкометалльное Zr-Nb-Hf-Ta-PЗЭ оруденение (Арбузов и др., 2003).

Нами приведены новые данные о связи редкометалльного оруденения в углях кемеровской свиты Кузнецкого бассейна и изыхской свиты Минусинского бассейна с вулканогенной пирокластикой схожего состава.

Угли и особенно золы углей изученных пластов характеризуются аномально высокими концентрациями Nb, Ta, Zr, Hf, Be, Sn, Y, PЗЭ, повышенными по сравнению с угольным кларком содержаниями Li, Ga, Co, Ni, Cu, Ba, Mo, W, Pb и Th.

Для угольного пласта XI кемеровской свиты Кузбасса аномалии Zr, Nb, Y, Hf, Sn, Ga, Be, PЗЭ, Th, W, Ta отчетливо приурочены к маломощному породному горизонту. Горизонт обнаруживается во всех сечениях, где был опробован угольный пласт, и выделяется повышенной радиоактивностью (30-50 мкР/ч). Данный породный прослой характеризуется аномальным содержанием большой группы литофильных редких металлов, включая Zr, Nb, Ta, Hf, Y, PЗЭ, Sn, Th и U. Концентрация ниобия в среднем для золы угля пласта XI составляет 650 г/т, непосредственно над породным прослоем достигает 0,43 %, в породном прослое – 264 г/т (рис. 10). Содержание тантала в угле пласта составляет в среднем 42 г/т, а в породном прослое – 57 г/т. Среднее содержание циркония в золе угля пласта XI составляет 0,19 %, над прослоем – 1,39 %, породный прослой содержит 0,19 %. Содержание гафния в среднем в золе угля составляет 32 г/т, непосредственно над партингом – 160 г/т, в прослое – 76 г/т.

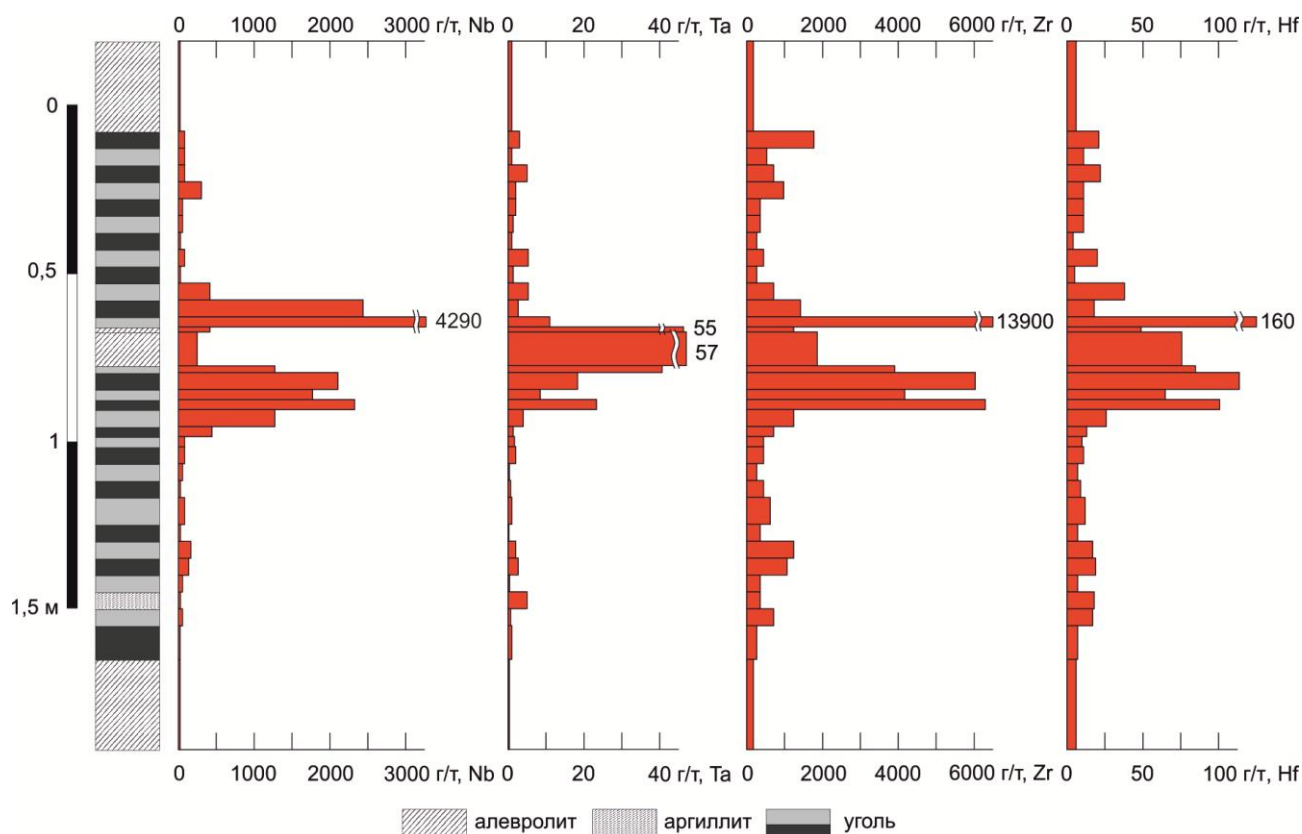


Рисунок 10. Распределение Nb, Ta, Zr, Hf в золе угля в вертикальном разрезе пласта XI, Кузбасс

Минеральный состав породного прослоя представлен кварцем, альбитом, калиевым полевым шпатом, минералами группы смектита и каолинита. В глинисто-гидрослюдистом материале прослоя диагностировано наличие порфиорокlastов, вероятно, сохранившихся от вулканического стекла.

В свою очередь, для угольных пластов XXXa и XXX изыхской свиты Минусинского угольного бассейна установлена связь аномальных концентраций редких металлов с породным прослоем, разделяющим угольные пласты. Данный прослой характеризуется аномальным содержанием литофильных элементов,

таких как Li, Be, Ga, Y, Zr, Nb, Sn, РЗЭ, Hf, Ta, Th, U, а также повышенной радиоактивностью – 25 мкР/ч. Концентрация ниобия в среднем для золы угля пластов XXXa и XXX составляет 320 г/т, непосредственно над породным прослоем достигает 0,26 %, в породном прослое – 114 г/т (рис. 11). Содержание тантала в золе угля составляет в среднем 5,1 г/т, а в породном прослое – 9,7 г/т. Среднее содержание циркония в золе угля пластов XXXa и XXX составляет 0,21 %, над прослоем – 1,4 %, породный прослой содержит 0,13 %. Содержание гафния в среднем в золе угля составляет 36 г/т, непосредственно над партингом 164 г/т, в прослое – 42 г/т.

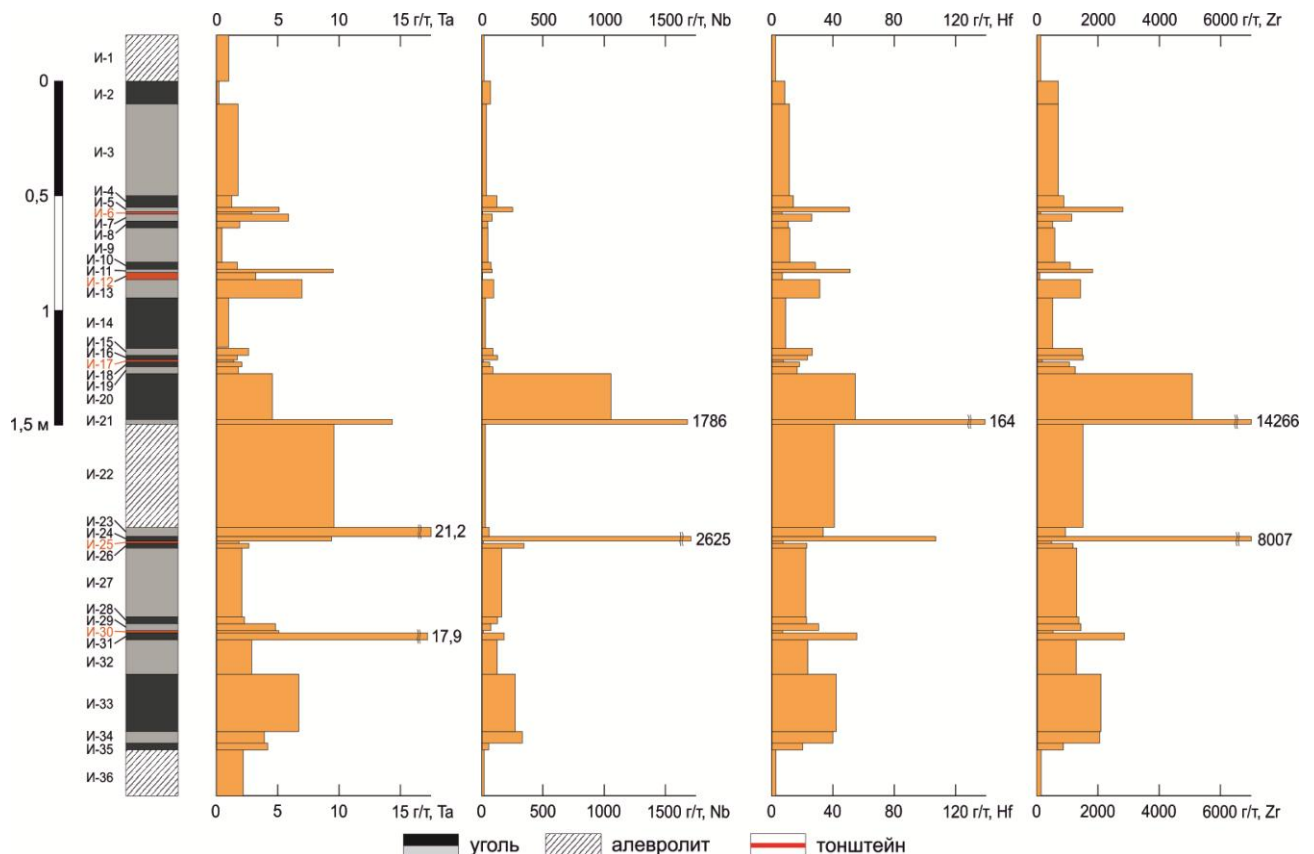


Рисунок 11. Распределение Ta, Nb, Hf, Zr в золе угля в вертикальном разрезе пластов XXXa и XXX Изыхского месторождения Минусинского бассейна

Минеральный состав данного породного прослоя представлен преимущественно каолинитом. В меньшей степени кварцем, калиевым полевым шпатом, альбитом и апатитом.

Сходство породных прослоев

Комплекс методов, используемый при реконструкции состава пеплов, из которых сформировались породные прослои, обнаруженные в пласте XI кемеровской свиты Кузбасса и в пласте XXX изыхской свиты Минусинского бассейна, позволил установить их исходный состав как пантеллеритовый. На рисунке 12 приведены спектры распределения нормированных значений РЗЭ в породах схожего состава. Графики характеризуются контрастной отрицательной

европиевой аномалией и преобладанием группы легких лантаноидов над тяжелыми.

Европиевый минимум (Eu/Eu^*) для прослая-междупластия из Минусинского бассейна составил 0,31, для прослая из пласта XI Кузнецкого бассейна – 0,18-0,19. Для пантеллеритового туфа из массива Улан-Толгой, европиевый минимум составил 0,04-0,05 (Ярмолук и др., 2016).

Особенности химического состава этих внутриугольных породных прослоев, состава минеральных новообразований в прослоях и в углях на контакте с ними позволяют идентифицировать их как аналоги. Их сходство подтверждают и различные геохимические критерии: положение на диаграмме Винчестера и Флойда, TiO_2/Al_2O_3 отношение, особенности распределения лантаноидов. По характеру кривой распределения РЗЭ прослой практически идентичны.

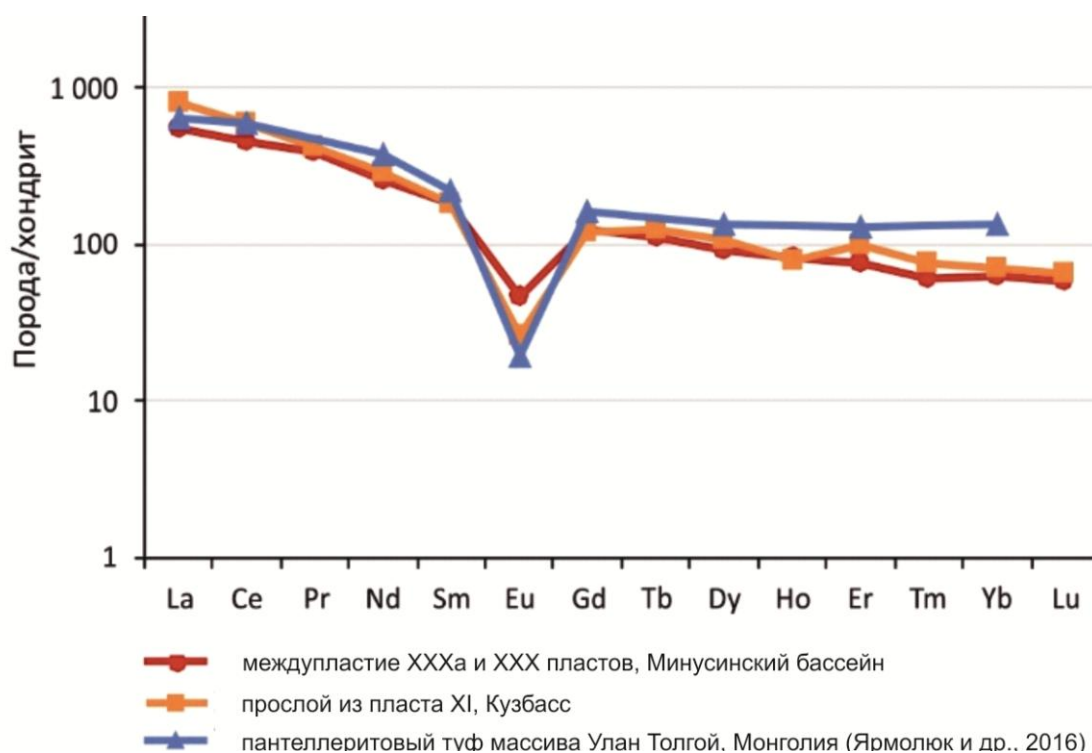


Рисунок 12. Спектры распределения РЗЭ в породных прослоях Минусинского бассейна, Кузнецкого бассейна и пантеллерите из массива Улан-Толгой, Монголия. Нормировано на хондрит (McDonough, Sun, 1995)

Полученные данные указывают на масштабное проявление кислого и щелочного вулканизма в период накопления изыхской и кемеровской свит раннепермского времени и расширяют перспективы выявления масштабного Zr-Nb-Hf-Ta-РЗЭ-Ga оруденения на территории Северной Азии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В угленосных отложениях пластах позднекарбонового и пермского возраста Минусинского и Кузнецкого бассейнов выявлены многочисленные свидетельства

вулканической деятельности, выраженные в многочисленных измененных пирокластических прослоях – тонштейнах.

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

Об апопепловом генезисе тонштейнов свидетельствуют реликтовые структуры и типы псевдоморфных минералов. Однако минеральный состав тонштейнов не позволяет реставрировать исходный состав пеплового материала из-за практически полного преобразования в агрессивной среде торфяного болота. Для идентификации, преобразованной вулканогенной пирокластики в Минусинском и Кузнецком угольных бассейнах был предложен комплекс критериев, включающий в себя титановый модуль ($\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$), диаграмму Nb/Y-Zr/TiO_2 , спектры распределения РЗЭ, содержание отдельных редких и радиоактивных элементов, особенности минерального состава.

Комплекс методов позволил определить состав исходного пеплового материала, послужившего источником для формирования тонштейнов Минусинского и Кузнецкого угольных бассейнов. Среди изученных тонштейнов преобладают продукты преобразования кислой пирокластики 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.

Различный состав исходного пирокластического материала проявляется не только в особенностях химического и минерального состава образованных из него тонштейнов, но и в формировании в углях на границе с тонштейнами специфических геохимических ассоциаций. Так, наиболее значимые концентрации РЗЭ, Zr, Nb, Hf, Ta, Th отмечаются в золе углей, вмещающих тонштейны, сформировавшиеся из пирокластики кислого состава, а также из разностей щелочного ряда. Эти данные согласуются с отчетливо выраженной литофильной редкометалльной специализацией угольных пластов Кузнецкого и Минусинского бассейнов, в которых было отмечено наличие измененной пирокластики.

С вулканогенной пирокластикой, выявленной в углях Минусинского и Кузнецкого бассейнов, связано комплексное Zr, Nb, Ta, РЗЭ, U, Th оруденение. В Минусинском бассейне такое оруденение выявлено в пласте XXX изыхской свиты в пределах Изыхского месторождения, а в Кузнецком бассейне - в пласте XI кемеровской свиты на юге бассейна.

Полученные данные указывают на масштабное проявление кислого и щелочного вулканизма в период накопления изыхской и кемеровской свит раннепермского времени и расширяют перспективы выявления масштабного Zr-Nb-Hf-Ta-РЗЭ-Ga оруденения на территории Северной Азии.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК и международные реферативные базы данных и системы цитирования

1. **Вергунов, А.В.** Минералогия и геохимия тонштейнов в углях Бейского месторождения Минусинского бассейна / **А.В. Вергунов**, С.И. Арбузов, В.М. Соболенко // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 2. – С. 155–166.
2. Арбузов, С.И. Геохимия, минералогия и генезис редкометалльно-угольного месторождения в пласте XI на юге Кузнецкого бассейна / С.И. Арбузов, **А.В. Вергунов**, С.С. Ильенок, В.А. Иванов, В.П. Иванов, Б.Р. Соктоев // Геосферные исследования. – 2019. – № 2. – С. 35-61.
3. Arbuzov, S.I. Geochemistry, mineralogy and genesis of rare metal (Nb-Ta-Zr-Hf-Y-REE-Ga) coals of the seam XI in the south of Kuznetsk Basin, Russia / S.I. Arbuzov, D.A. Spears, **A.V. Vergunov**, S.S. Ilenok, A.M. Mezhibor, V.P. Ivanov, N.A. Zarubina // Ore Geology Reviews. – 2019. – V. 113. – Article 103073.
4. **Вергунов, А.В.** Минералогия, геохимия и генезис редкометалльного Zr-Nb-Hf-Ta-REE-Ga оруденения в пласте XXX Минусинского бассейна / А.В. Вергунов, С.И. Арбузов, В.В. Еремеева // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 7. – С. 49-62.
5. **Вергунов, А.В.** Минералогия и геохимия тонштейнов в углях Черногорского месторождения Минусинского бассейна / А. В. Вергунов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 6. – С. 118–129.

Публикации в иных изданиях, включая сборники и материалы конференций

6. Арбузов, С.И. Минералого-геохимическая идентификация продуктов взрывного 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.
7. **Вергунов, А.В.** Минералого-геохимические особенности тонштейнов Минусинского угольного бассейна / А.В. Вергунов // Вопросы естествознания. – 2018. – № 4 (18). – С. 14-17.
8. **Вергунов, А.В.** Геохимия тонштейнов в углях Минусинского бассейна / А.В. Вергунов // Геохимия нефти и газа, нефтематеринских пород, угля и горючих сланцев: Материалы Всероссийской научной конференции. – Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2019. – С. 20-21.
9. **Вергунов, А.В.** Редкометалльно-угольное месторождение в пласте XI на юге Кузбасса / А.В. Вергунов, С.И. Арбузов // Минерально-сырьевая база алмазов, благородных и цветных металлов – от прогноза к добыче. Сборник тезисов докладов II Молодежной научно-образовательной конференции ЦНИГРИ. – М.: ЦНИГРИ, 2021. – С. 24-29.