

Главные результаты Института геологии и геохронологии докембрия РАН за 2021-2022 годы

А.Б. Кузнецов, Т.С. Зайцева, Ю.М. Лебедева

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии и геохронологии докембрия Российской академии наук
199034, Санкт-Петербург, Набережная Макарова, дом 2

Институт геологии и геохронологии докембрия Российской Академии наук (ИГГД РАН) ведет свое начало от Лаборатории геологии докембрия Академии наук (ЛАГЕД АН СССР), созданной в 1950 г. В то время это было единственное в мире научное учреждение по исследованию древних геологических пород докембрийской эры. В 1967 г. ЛАГЕД была преобразована в ИГГД РАН с сохранением научной школы. Уникальность учреждения состояла в том, что ЛАГЕД-ИГГД объединил два научных направления: геологию-петрологию и радиохимию. Петрологический отдел изучал породы и минералы, образовавшихся в условиях высоких температур и давлений в присутствии флюидов. Радиохимический отдел занимался разработкой методов геохронологии – методов определения возраста пород и минералов. Сочетание этих дисциплин дало синергетический эффект, который позволил учреждению стать колыбелью отечественной геохронологии и изотопной геологии. В настоящее время ИГГД РАН выполняет фундаментальные, поисковые и прикладные исследования, направленные на получение новых знаний о вещественной, изотопно-геохимической, биостратиграфической и геодинамической эволюции земной коры на самых ранних и поздних стадиях развития Земли, а также о преобразовании внеземного, мантийного, рудогенного и осадочного вещества.

В 2022 г. и второй половине 2021 г. коллективами восьми лабораторий института проведены исследования по различным научным направлениям, как в рамках государственного задания института, так и по проектам, финансируемым РФФИ и РФФИ. Проведено моделирование параметров метаморфических и метасоматических процессов при высоких и сверхвысоких РТ, соответствующих разным глубинам литосферы и разным количествам флюида. Реконструированы условия метаморфического преобразования гранатовых гнейсов Мейрской зоны и мраморов Рускеалы в Северном Приладожье. Определены С- и Sr-изотопные характеристики свекофенского океана. Разработаны новые методы определения возраста высокоурановых цирконов из магматических комплексов. Установлен возраст формирования слюдоносных пегматитов крупнейшего Мамского месторождения слюды в Восточной Сибири. Выделено три этапа извержений базальтов (конец мезозоя – палеоген) в Восточной Монголии и определен глубинный

источник вулканических расплавов. Получены доказательства, что 900-600 млн. лет назад обломочный материал со Sveco-Norwegian гор и гранитов-рапакиви Фенноскандии был перенесен в сторону современного Южного Урала на расстояние 4–5 тыс. км. Выделено 6 ассоциаций ископаемых макро- и микроорганизмов (скв. Северо-Полоцкая, Беларусь), имеющих потенциал для прослеживания границы докембрий-кембрий. На примере метеорита Орловка установлено отсутствие гомогенизации летучих элементов, что исключает гипотезу прямой конденсации хондритов из протопланетного газово-пылевого облака.

Лаборатория флюидных процессов. Метаморфические и метасоматические преобразования пород развиваются при фильтрации флюида вдоль температурного градиента теплового поля, создаваемого магматическими очагами и глубинными тепловыми потоками. При фильтрации во флюиде происходят разнообразные процессы диссоциации кислот и оснований, смещения равновесий гидролиза, изменения растворимости минералов, контролирующие характер метасоматоза и рудообразования. Для выявления связи между свойствами теплового поля, геохимическими характеристиками флюидного потока и продуктами метасоматического петрогенезиса сделана попытка объединения тепловой и физико-химической моделей взаимодействия флюид-порода [1].

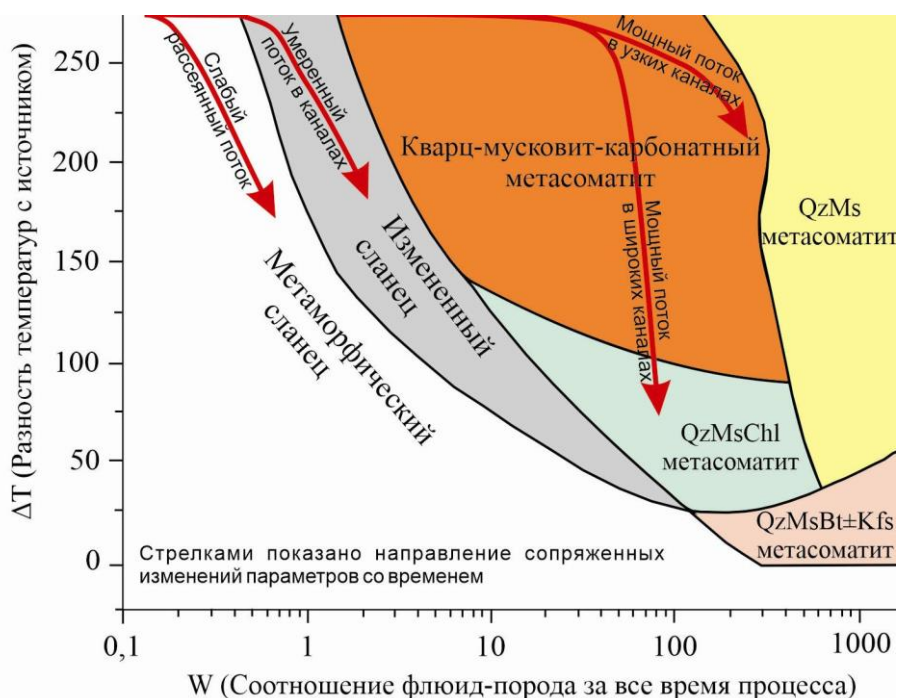


Рис. 1. Величины флюидного потока и теплового поля при образовании потенциально золоторудных кварц-мусковит-карбонатных метасоматических пород и ассоциирующих с ними метасоматитов

Представлены численные модели метасоматических процессов при сопряженном переносе тепла и растворенного вещества в режиме фронтального и

сфокусированного движения вертикального потока флюида от источника во вмещающий метаморфический сланец. Изменение температуры рассчитано по уравнениям кондуктивного и адвективного распространения тепла в проницаемой среде, а результаты взаимодействия флюида и породы – средствами программного комплекса NCh. Модели демонстрируют зависимость минерального состава метасоматических пород и кислотности флюида от величины флюидного потока в одиночных или сближенных проницаемых каналах разной ширины, расстояния от источника и отношения флюид/порода за все время процесса. В итоге установлены важнейшие параметры, определяющие образование конкретных типов метасоматитов, в том числе потенциально золоторудных кварц-мусковит-карбонатных пород (рис. 1).

Лаборатория петро- и рудогенеза. Метаморфический комплекс Северного Приладожья в Южной Карелии привлекает внимание многих исследователей из-за проявления в нем зонального метаморфизма. Минеральные преобразования, которые произошли в надвиговой зоне, именуемой Мейерской, характеризуются широким развитием водосодержащих минералов. Это указывает на то, что в этой зоне помимо традиционных метаморфических факторов действовал дополнительный параметр.

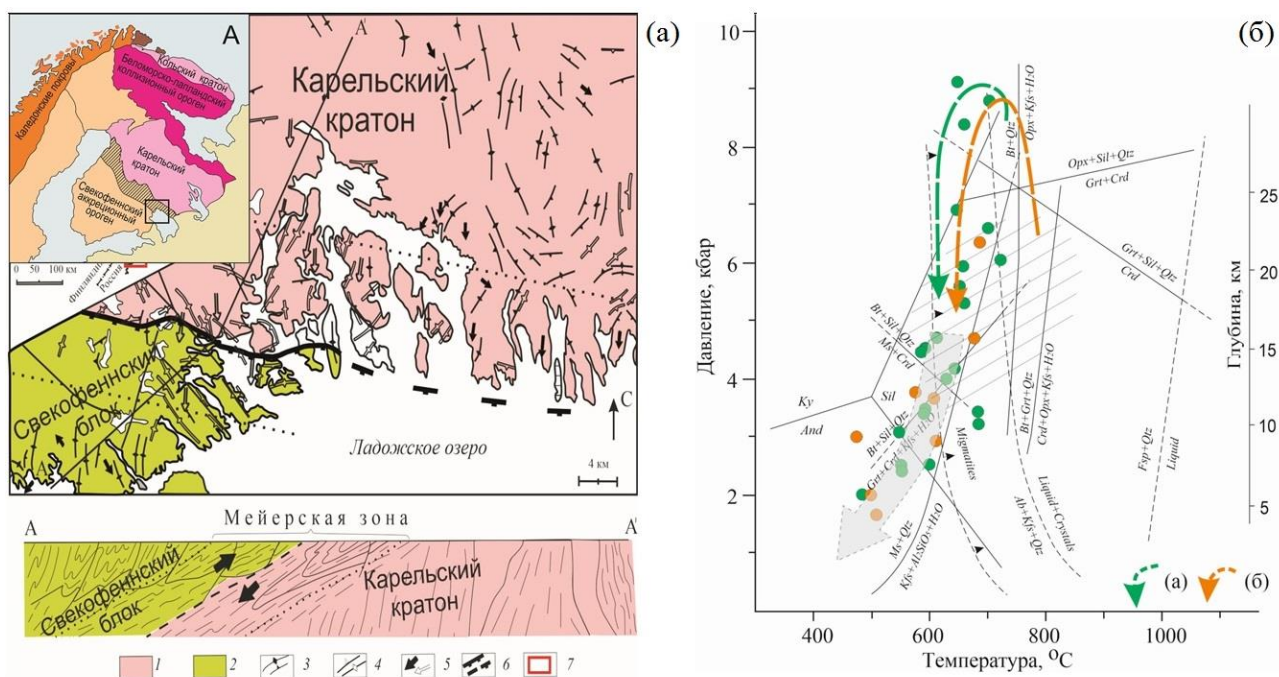


Рис. 2. (а) – Схема зоны сочленения Карельского кратона и Свеккофеннского блока и разрез Мейерской надвиговой зоны. 1 – архейский фундамент Карельского кратона, 2 – палеопротерозойские породы Свеккофеннского блока, 3-5 – ориентировка сланцеватости: пологой и крутопадающей, 6 – положение сместителя Мейерского надвига, 7 – изученная площадь. Врезка (б). Схематизированный *PT*-тренд развития надвиговой зоны. Цветными линиями показано изменение *PT*-параметров для аллохтонного (а) и автохтонного (б) блоков. Цветные кружки показывают оценки *PT*-параметров на разных стадиях развития надвига, полученные по образцам блоков: аллохтонного (зеленые) и автохтонного (розовые)

Выявлен и количественно охарактеризован феномен появления избыточного давления при преобразовании пород в мощной Мейрской сдвиговой тектонической зоне на территории Северного Приладожья. При надвигании аллохтонного высокотемпературного блока свекофеннид на автохтонный блок окраины Карельского кратона выявленный добавочный компрессионный эффект фиксируются по наиболее богатым кальцием гранатам в парагенезисе с плагиоклазом и слюдами. Оцененное давление минералообразования достигает 8–9 кбар, что превышает давление в окружающих породах на 2–3 кбар (рис. 2б). Таким образом, тектоническая нагрузка обеспечила добавочное давление минералообразования в сдвиговой зоне, эквивалентное погружению пород на 6–8 км [2].

Лаборатория Изотопной геологии. Разработаны новые методические подходы к U-Pb (ID TIMS) датированию высокоуранового метамиктизированного циркона (рис. 3), которые позволяют получать ранее недоступную информацию о возрасте магматических комплексов, с которыми связаны месторождения стратегического сырья и соответственно открывают новые перспективы прогноза минеральных ресурсов [3; 4].

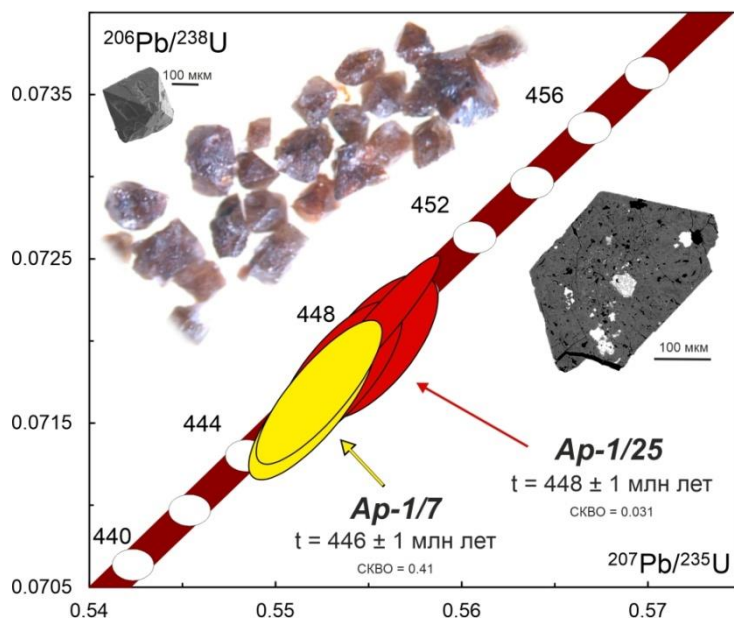


Рис. 3. Диаграмма с конкордией для изученных образцов метамиктного циркона

Лаборатория изотопной хемотратиграфии и геохронологии осадочных пород. Кальцитовые и доломитовые мраморы представляют собой метаморфизованные карбонатные осадки, свидетельствующие о присутствии океана в далеком прошлом. Карьер Рускеала с находится рядом с г. Сортавала и является старейшим местом добычи облицовочных мраморов в Северном Приладожье. Благодаря высокому декоративному качеству, рускеальские мрамора широко использовались в архитектуре и отделке интерьеров Петербурга с середины

XVII века. Комплексное петрологическое и изотопно-геохимическое изучение мраморов Рускеала (сортавальская серия) в Раахе-Ладожской зоне Карелии доказало, что кальцитовые и доломитовые мраморы даже в условиях среднетемпературной амфиболитовой фации (550–600°C, ~3–5 кбар) сохраняют потенциал для реконструкции $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ и $\delta^{13}\text{C}$ изотопных характеристик докембрийского океана [5].

Первичные карбонатные осадки, из которых сформировались мраморы Рускеалы, отлагались в древнем свекофенском океане около 2 млрд. лет назад. Впервые восстановленное отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в свекофенском океане (0,70463–0,70493) показывает резкое увеличение доли радиогенного ^{87}Sr в ответ на прирост континентальной коры 2 млрд. лет назад (рис. 4). Величина $\delta^{13}\text{C}$ (+1,2 ± 1,0 ‰) в мраморах Рускеалы фиксирует начало С-изотопного стазиса в океане после ломагунди-ятулийской углеродной аномалии, вызванной крупной биосферной перестройкой [5; 6].

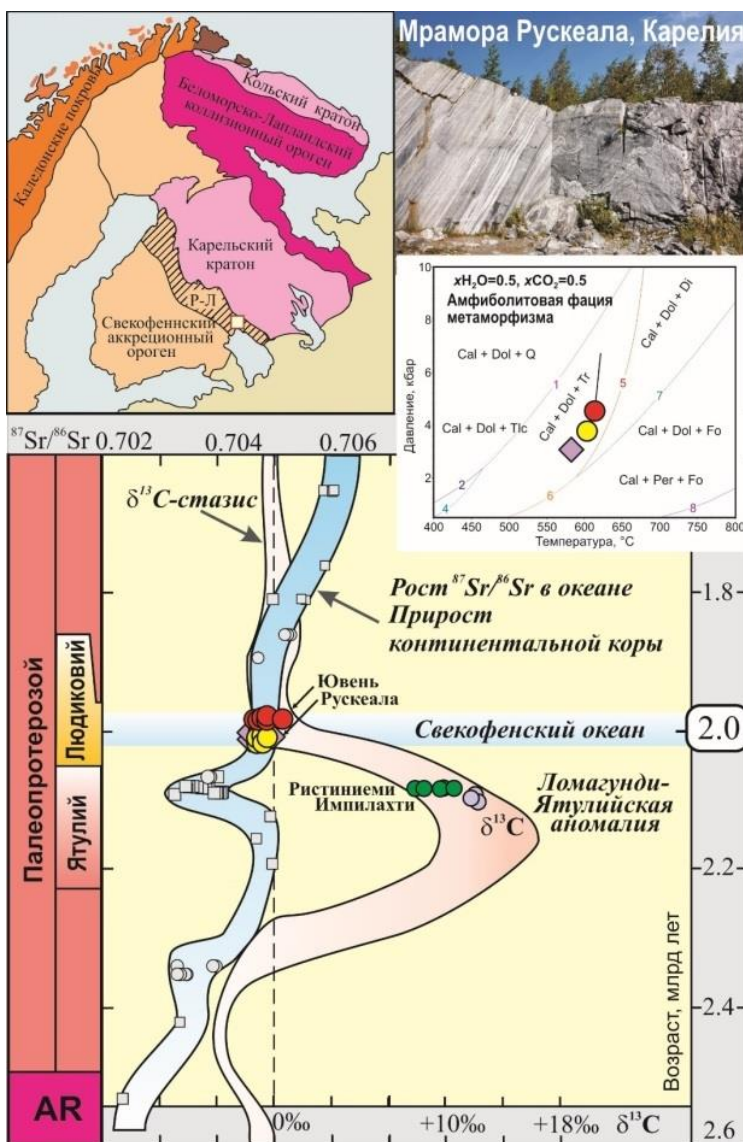


Рис. 4. Значения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ и $\delta^{13}\text{C}$ в мраморах сортавальской серии (Рускеала, Ювель, Ристиниеми и Импилахти) Карелии на фоне вековых вариаций этих параметров в докембрийском океане. Положение района работ в Раахе-Ладожская зона южной Карелии и полибарические P – T диаграммы для силикатно-карбонатных пород в системе SMASH– CO_2 с избытком кальцита и доломита над кремнеземом

Лаборатории Металлогении и рудогенеза и Изотопной геологии.

Слюдоносные пегматиты и пегматоидные граниты имеют ключевое значение для реконструкции завершающих этапов геологической истории докембрийских складчатых поясов. В Байкальской горной области находится Мамская слюдоносная провинция – одна из крупнейших в мире по объёму извлеченного листового мусковита. Промышленные запасы составляют 80% от разведанных в России.

Впервые определен U-Pb возраст циркона из секущих плагиоклазовых и двуполевошпатовых пегматитов, что позволяет выделить два этапа структурно-метаморфической активизации в Мамской зоне – 388 и 333 млн. лет назад (рис. 6). Установленный масштабный разрыв во времени между этапами пегматитообразования (55 млн. лет) раскрывает металлогенический потенциал палеозойских внутриплитных тектонических событий, проявленных в Байкальском геоблоке на окраине Сибирского кратона [3].

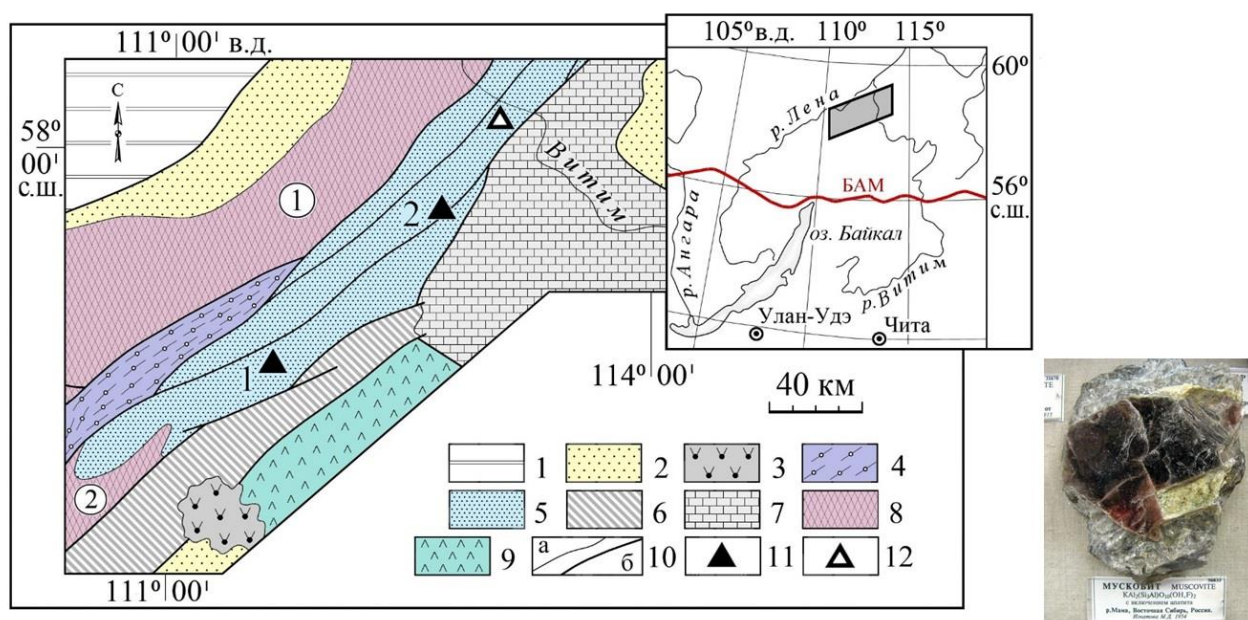


Рис. 5. Схема тектонического районирования Северо-Байкальского нагорья и местоположения изученных слюдоносных пегматитов (на врезке район Мамской зоны). 1 – Сибирская платформа; 2 – отложения эдиакария; 3 – Сыннырский щелочной массив; Тектонические зоны Байкало-Патомского пояса (4 – 7): 4 – Миня-Кутимская; 5 – Мамская; 6 – Олоkitская; 7 – Тамаракская; 8 – Чуйский (1) и Кутимский (2) выступы фундамента кратона; 9 – Байкало-Витимский вулканоплутонический пояс; 10 – геологические границы (а) и тектонические швы (б); 11 – местоположение пегматитовых полей с изученными пегматитами (1 – Мочикитское, 2 – Слюдянское); 12 – Колотовское

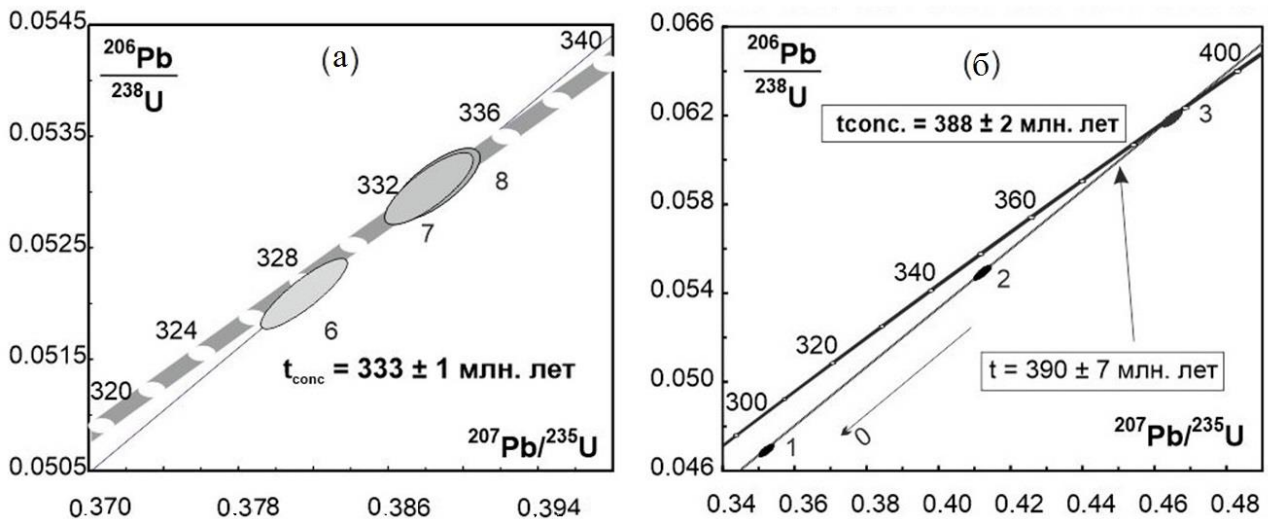


Рис. 6. Диаграммы с конкордией и U-Pb возраст. (а) – для плагиоклазовых пегматитов; (б) – для двуполевошпатовых пегматитов

Лаборатория изотопной хемотратиграфии и геохронологии осадочных пород. Обломочные цирконы в песчаниках и осадках традиционно привлекаются для определения состава размываемых пород и поиска их источников. Морфологические особенности зерен циркона из песчаников позднего докембрия Южного Урала показали, что в области размыва 1,70–0,54 млрд. лет назад преобладали преимущественно местные комплексы пород – протоуральские и прилегавшей Волго-Уральской области. Этот вывод был справедлив для отложений раннего и среднего рифея Южного Урала. Однако наиболее спорным оказался интервал позднего рифея и венда (1,00–0,54 млрд. лет назад).

Определен U-Pb возраст (LA-ICP-MS) обломочного циркона из известняков укской свиты, слагающей верхний горизонт стратотипа верхнего рифея на Южном Урале [7]. Анализ новых и полученных ранее данных показал, что ближайшие породы фундамента Волго-Уральской области, имеющие архейский и раннепротерозойский возраст, поставляли только половину зерен обломочного циркона. Магматические комплексы Урала (бердяушский, рябиновский, губенский и ахмеровский) с возрастом 1,35–1,40 млрд. лет поставляли менее 10 % зерен. Преобладающим источником обломочного циркона в позднерифейское время были породы гренвильского Свеко-Норвежского орогена (1,13–1,16 млрд. лет) и граниты-рапакиви Фенноскандии (1,44–1,56 млрд. лет). Полученные данные допускают существование панконтинентальной реки, переносившей в позднем докембрии обломочный материал на 4 000–5 000 км с одного края Восточно-Европейской платформы на противоположный (рис. 7).

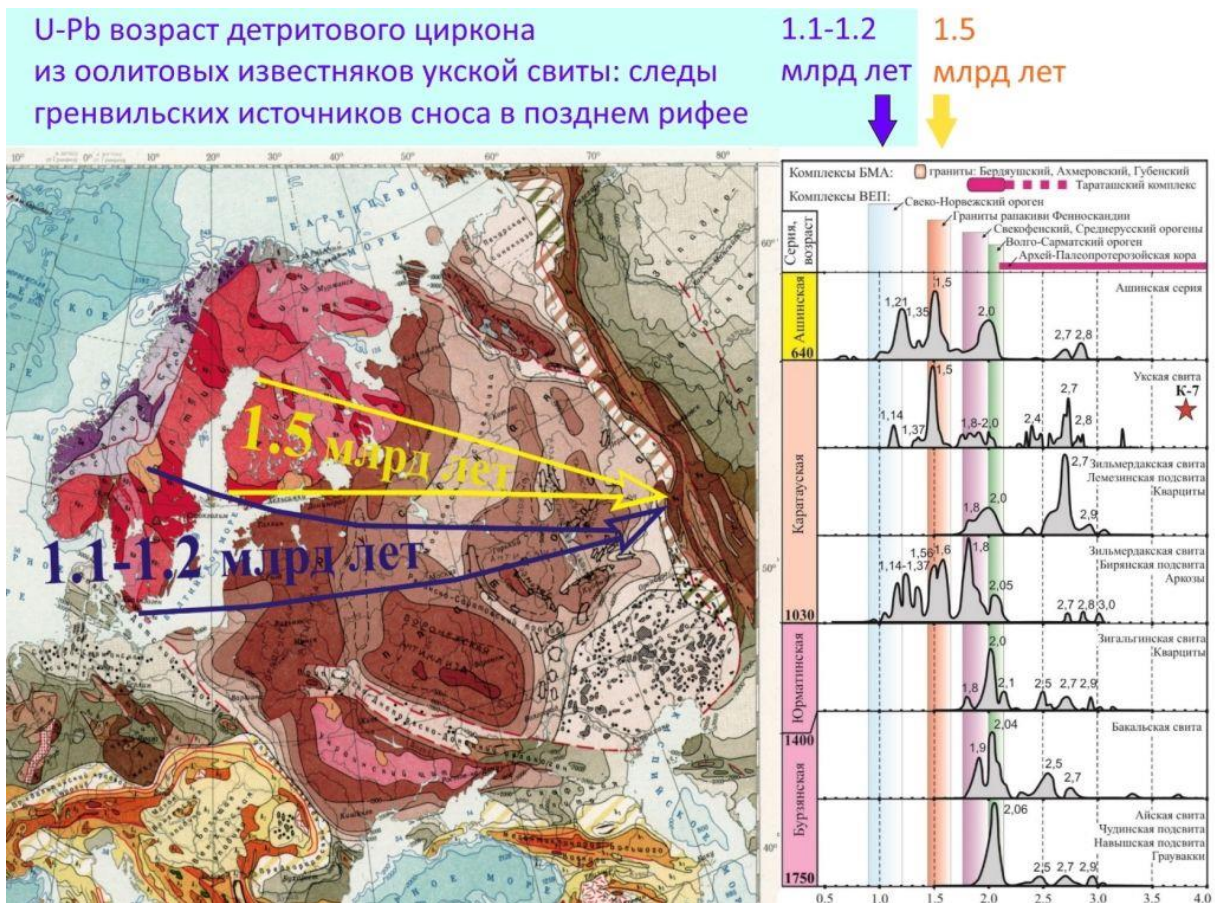


Рис. 7. Направление сноса обломков циркона из гренвильской и свекофенской провинций на восточный край Восточно-Европейской платформы в позднем рифее и венде (неопротерозое). Справа графики плотности распределения U-Pb возрастов детритового циркона из отложений рифея и венда Башкирского мегантиклинория Южного Урала

Лаборатория геохронологии и геохимии изотопов. Получены новые данные о возрасте, химическом составе и изотопных (Sr, Nd и Pb) характеристиках вулканических пород Восточной Монголии. Впервые в пределах региона выделено три последовательных этапа извержений, проявивших себя в позднем мезозое и раннем кайнозое (рис. 8). Каждый этап имел особые структурные и вещественные характеристики. В раннемеловую эпоху (135–100 млн. лет) изливались базальты щелочной и высококалиевой известково-щелочной серий. В начале позднемеловой эпохи (104–90 млн. лет) на восточном фланге области формировались щелочные и Na-K базальтоиды, а в конце позднего мела и раннем палеогене (87–51 млн. лет) на западном фланге области – Na-K базальтоиды (базаниты). Новые Sr, Nd и Pb изотопные данные вместе с результатами термодинамического моделирования процессов плавления и эволюции магм свидетельствуют о том, что источником вулканических расплавов для базальтов было глубинное мантийное вещество, отвечающее нескольким типам пород [8].

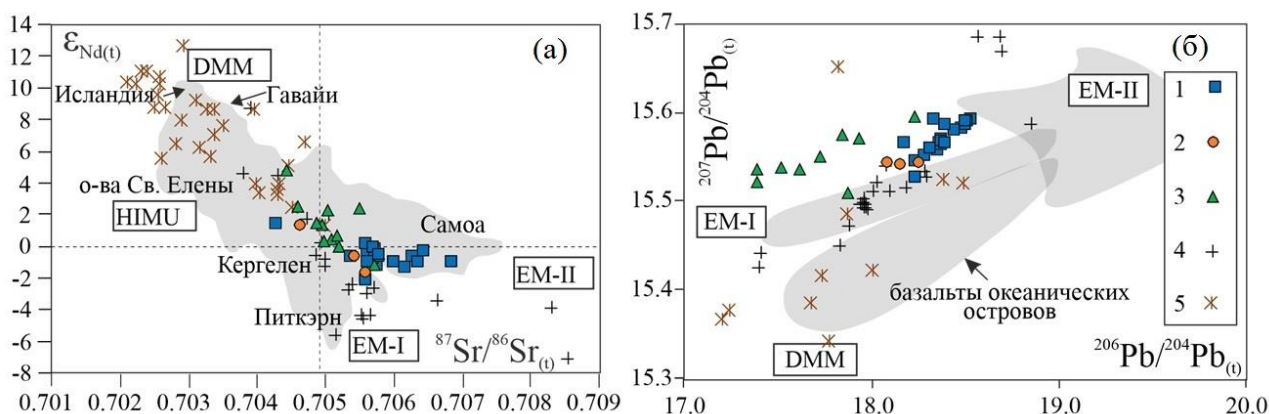
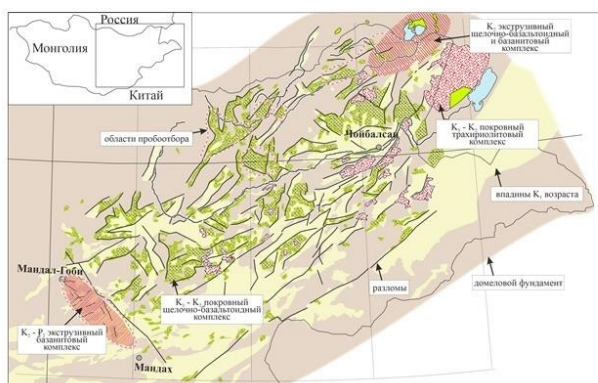


Рис. 8. Схема строения вулканической области Восточной Монголии. Врезка (а) и (б) – диаграммы в координатах $\epsilon_{Nd}-^{87}Sr/^{86}Sr_{(t)}$ и $^{207}Pb/^{204}Pb_{(t)}-^{206}Pb/^{204}Pb_{(t)}$. 1 – K_1-K_2 вулканы покровного щелочно-базальтоидного комплекса, 2 – K_2 вулканы экструзивного щелочно-базальтоидного и базанитового комплекса, 3 – K_2-P_2 вулканы экструзивного базанитового комплекса, 4 – ксенолиты нижнекоровых гранулитов Монголии, 5 – ксенолиты мантийных лерцолитов Монголии

Лаборатория литологии и биостратиграфии. Палеонтологические исследования, направленные на поиск единых критериев для обоснования границы докембрия–кембрия имеют особое значение. Одним из критериев положения этой границы являются микро- и макроскопические ископаемые организмы, которые сохраняются в древних отложениях.

Изучение ископаемых организмов из венд-кембрийских отложений новой скважины Северо-Полоцкая, пробуренной в 2019 г. на севере Беларуси, позволило выделить 6 палеонтологических ассоциаций микро- и макроскопических ископаемых организмов (Рис. 9). Они образуют единую непрерывную последовательность смены редкинской (580–559 млн. лет), котлинской (559–540 млн. лет), ровенско-лонтоваской (559–540 млн. лет) и лонтоваской (540–529 млн. лет) ассоциаций ископаемых организмов [9]. Эти находки позволяют рассматривать разрез, вскрытый скв. Северо-Полоцкая в качестве опорной для центральных районов Восточно-Европейской платформы. Кроме того, в составе пятой ассоциации были обнаружены новые трубчатые спиралевидные формы микрофоссилий *Tubula tortusa* Golubkova, Kushim, Kuzmenkova et Laptsevich, типичные для раннего кембрия [10].

Полученные данные (рис. 9) существенно дополняют палеонтологическую характеристику переходных отложений венда-кембрия и могут быть использованы в палеофациальных построениях, а также при разработке единой Региональной стратиграфической схемы Восточно-Европейской платформы и для сопредельных территорий России и Беларуси [9, 10].

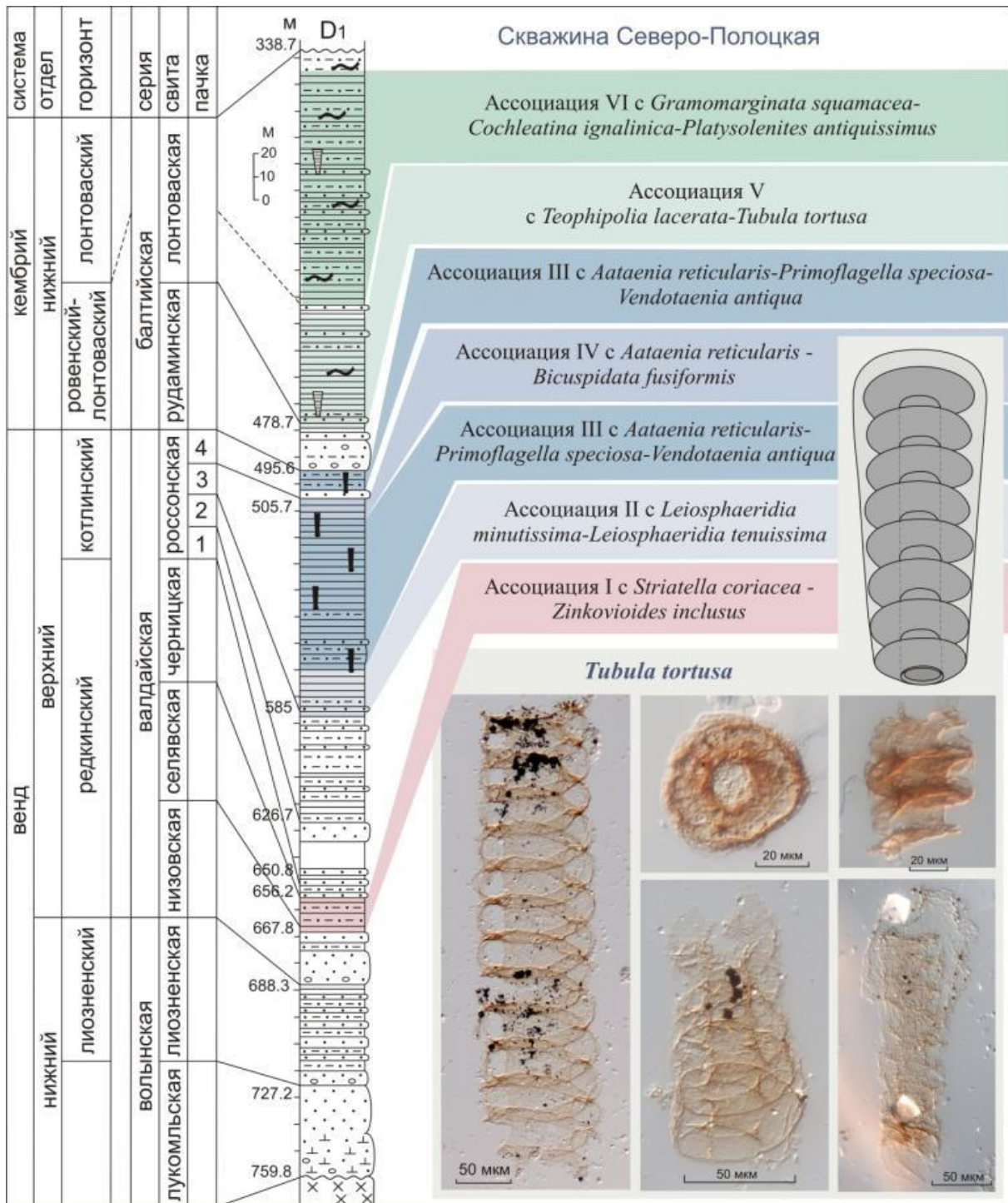


Рис. 9. Положение ассоциаций ископаемых организмов в разрезе скв. Северо-Полоцкая и их фотоизображение

Лаборатория геологии и геодинамики. Равновесные обыкновенные хондриты, являются наиболее распространенным типом метеоритов и используются для исследования условий образования первичного вещества на ранних этапах становления Солнечной системы.

Метеорит Орловка – один из крупнейших экземпляров равновесного обыкновенного хондрита, обнаруженных в Западной Сибири. Его вес составляет 40,5 кг, а первоначальный размер 21×30×37 см. В метеорите Орловка обнаружена порфирировая хондра, оливин и плагиоклаз которой обогащены редкими элементами относительно других минералов метеорита, а также хондр неравновесных обыкновенных и углистых хондритов. Исследование особенностей распределения редких элементов в оливине и плагиоклазе порфирировых хондр Орловка (рис. 10) показало отсутствие признаков гомогенизации рефракторных и умеренно летучих элементов в результате термального метаморфизма на родительских телах хондритов.

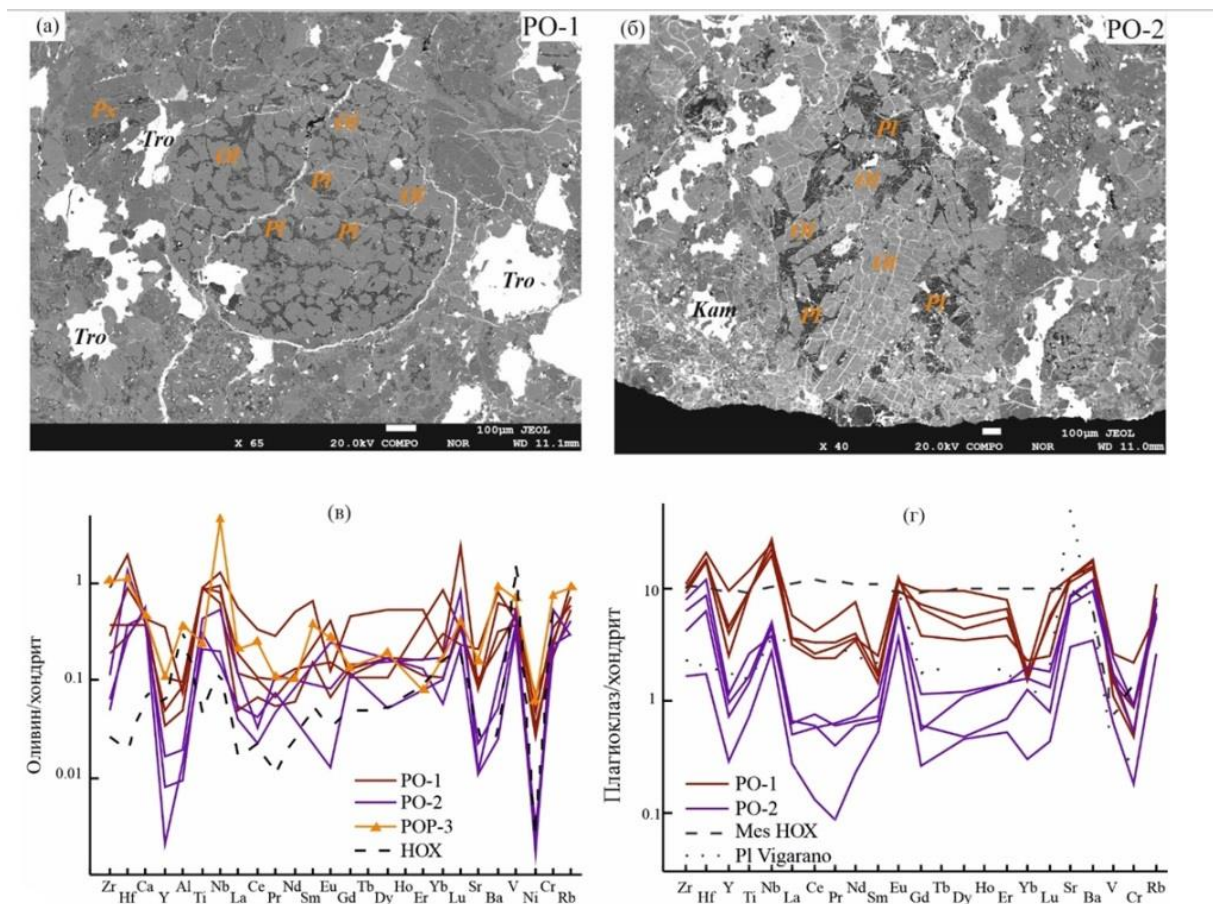


Рис. 10. Фотографии и минеральный состав хондр PO-1 (а), PO-2 (б) метеорита Орловка в обратно-отраженных электронах. Ol – оливин, Px – пироксен, Pl – плагиоклаз, Tro – троилит, Кам – камасит. Содержание редких элементов в оливине (в) и плагиоклазе (г) хондр метеорита Орловка, нормированные к CI хондриту. HOX – неравновесные обыкновенные хондриты. Mes – мезостазис

Сосуществование геохимически различных хондр в теле одного метеорита согласуется с гипотезой о появлении расплава хондр в результате плавления минералов-предшественников (СА1 и АОА включения, предыдущие генерации хондр) в первичном протопланетном газовой-пылевом облаке. Этот вывод исключает гипотезу о прямой конденсации газ/расплав [11].

Лаборатория Флюидных процессов. Разработана новая численная термодинамическая модель одной из важнейших геологических флюидных систем – тройной системы $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}$ при $P-T$ условиях средней и нижней коры и границы кора-мантия (до $P = 20$ кбар и $T = 1400^\circ\text{C}$). Впервые в этой системе установлен распад гомогенных флюидов при высоких и ультравысоких $P-T$ параметрах нижней коры на несмешивающиеся флюиды (на рассолы и водно-газовые флюиды). Полученные результаты (рис. 11) позволяют рассматривать область перехода от нижней коры к литосферной мантии не только областью существования гомогенных флюидов, но областью зарождения и концентрации несмесимых солевых и водно-газовых флюидов. Численные значения и тенденции изменения таких важнейших характеристик флюида, как химические активности компонентов и плотности флюидов, существенно различаются в гомогенном флюиде и сосуществующих несмесимых флюидах. Взаимодействие с окружающими породами того или иного флюида должно значимо отличаться и по способности флюида к просачиванию, и по транспортной подвижности всех химических элементов, и по $P-T$ условиям минеральных реакций и плавления во время процессов преобразования вещества литосферной мантии и коры [12].

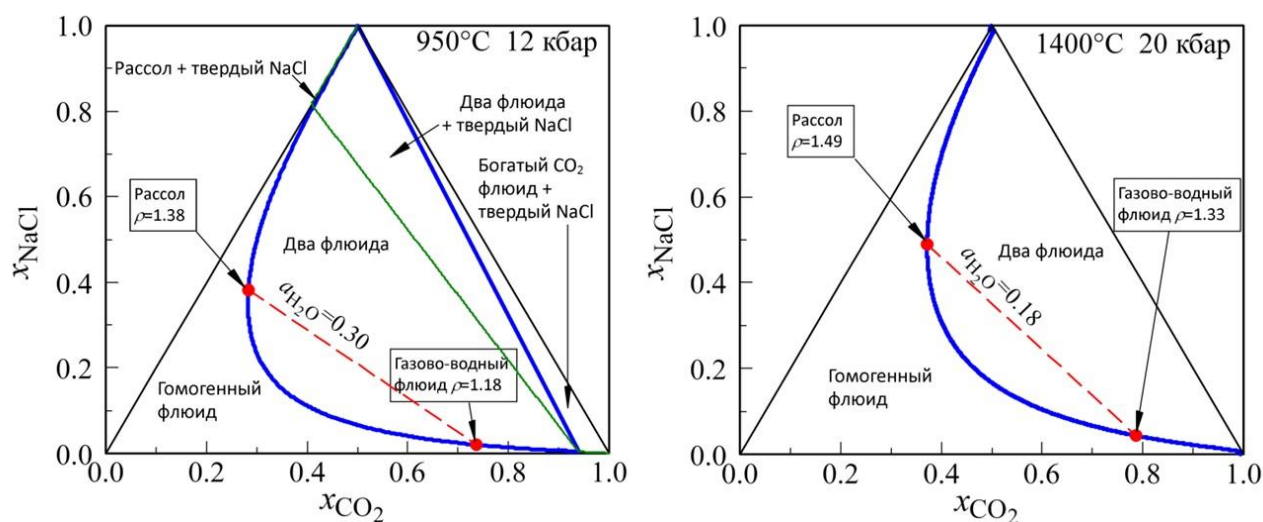


Рис. 11. Фазовые диаграммы флюидной системы $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}$, плотности флюидов и химические активности воды

Литература

1. *Кольцов А.Б., Бушмин С.А.* Метасоматоз в термоградиентных условиях: модели сопряженного переноса тепла и взаимодействия флюид-порода // *Петрология.* – 2022. Т. 30. № 3. С. 309–330. DOI: 10.31857/S0869590322030049.
2. *Балтыбаев Ш.К., Вивдич Э.С., Галанкина О.Л., Борисова Е.Б.* Флюидный режим формирования гнейсов в Мейерской надвиговой зоне Северного Приладожья (юго-восток Фенноскандинавского щита) // *Петрология.* – 2022. Т. 30. № 2. С. 166–193. DOI: 10.31857/S0869590322020029.
3. *Ткачев А.В., Сальникова Е.Б., Рыцк Е.Ю., Котов А.Б., Иванова А.А., Толмачева Е.В., Плоткина Ю.В.* О возрасте формирования пегматитов мамской Слюдонской провинции: новые U-Pb (ID-TIMS) данные по циркону // *ДАН. Науки о Земле.* – 2022. Т. 507. № 2. С. 163–170. DOI: 10.31857/S2686739722601533.
4. *Лыхин Д.А., Ярмолюк В.В., Сальникова Е.Б., Котов А.Б., Иванова А.А., Плоткина Ю.В.* U-Pb-возраст редкометалльных щелочных гранитов месторождения Снежное: к оценке возрастной однородности гранитоидов огнитского комплекса (Восточный Саян) // *Докл. РАН. Науки о Земле.* – 2022. Т. 506. № 2. С. 148–157. DOI: 10.31857/S2686739722600801.
5. *Кузнецов А.Б., Горохов И.М., Азимов П.Я., Дубинина Е.О.* Sr- и C-хемостратиграфический потенциал палеопротерозойских осадочных карбонатов в условиях среднетемпературного метаморфизма: мраморы Рускеалы, Карелия // *Петрология.* – 2021. Т. 29. № 2. С. 172–194. DOI: 10.31857/S0869590321010039.
6. *Горохов И.М., Кузнецов А.Б., Азимов П.Я., Дубинина Е.О., Васильева И.М., Ризванова Н.Г.* Sr- и C-изотопная хемостратиграфия метакarbonатных пород палеопротерозойской сортавальской серии, Фенноскандинавский щит, северное Приладожье // *Стратиграфия. Геологическая корреляция.* – 2021. Т. 29. № 2. С. 3–22. DOI: 10.31857/S0869592X21020022.
7. *Зайцева Т.С., Кузнецов А.Б., Сергеева Н.Д., Адамская Е.В., Плоткина Ю.В.* U-Th-Pb возраст детритового циркона из оолитовых известняков укской свиты: следы гренвильских источников сноса в позднем рифее Южного Урала // *Доклады РАН.* – 2022. Т. 503. № 2. С. 14–20. DOI: 10.31857/S2686739722040195.
8. *Кузнецов М.В., Саватенков В.М., Шпакович Л.В., Ярмолюк В.В., Козловский А.М.* Эволюция источников магматизма Восточно-Монгольской вулканической области: по данным геохимических и Sr-Nd-Pb изотопных исследований // *Петрология.* – 2022. Т. 30. № 5. С. 457–479. DOI: 10.31857/S086959032205003X.
9. *Голубкова Е.Ю., Кузьменкова О.Ф., Лапцевич А.Г., Кушим Е.А., Воскобойникова Т.В., Силиванов М.О.* Палеонтологическая характеристика верхневендских–нижнекембрийских отложений в разрезе скважины Северо-Полоцкая

Восточно-Европейской платформы, Беларусь // Стратигр. Геол. корреляция. – 2022а. Т. 30. № 6. С. 1–19. DOI: 10.31857/S0869592X22060072.

10. Голубкова Е.Ю., Кушим Е.А., Кузьменкова О.Ф., Лапцевич А.Г. Раннекембрийские биоты юга Латвийской седловины Восточно-Европейской платформы, Беларусь // Палеонтол. журн. – 2022б. № 6. С. 1–8. DOI: 10.31857/S0031031X22060058.

11. Суханова К.Г., Кузнецов А.Б., Скублов С.Г. Геохимические особенности хондр метеорита Орловка (Н5) как свидетельство плавления минералов-прекурсоров // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2022. Т. 504. № 1. С. 28–33. DOI: 10.31857/S2686739722050164.

12. Иванов М.В., Бушмин С.А. Термодинамическая модель флюидной системы H_2O-CO_2-NaCl при P-T параметрах средней и нижней коры // Петрология. – 2021. Т.29. № 1. С.90–103. DOI: 10.31857/S0869590320060035.