

Институт земной коры СО РАН

**«Орогенез: образование и рост континентов
и суперконтинентов»**

Материалы рабочего совещания лаборатории
орогенеза по итогам одноименного проекта

Листвянка, 2021

УДК 551.24
ББК Д392я431
О 69

Орогенез: образование и рост континентов и суперконтинентов: Материалы рабочего совещания (пос. Листвянка, 15-17 октября 2021 г.). – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2021. – 30 с.

В сборнике представлены материалы рабочего совещания «Орогенез: образование и рост континентов и суперконтинентов», проводимой в рамках одноименного проекта Правительства РФ № 075-15-2019-1883, и освещены тематики, разрабатываемые участниками проекта.

Сборник рассчитан на широкий круг специалистов, занимающихся исследованиями в различных областях наук о Земле.

Председатель Оргкомитета
к.г.-м.н. С.А. Писаревский

Ученый секретарь
Н.М. Петрова

Проведение рабочего совещания и издание материалов осуществляются при организационной поддержке Института земной коры СО РАН и Правительства РФ (по Постановлению р220, грант № 075-15-2019-1883).

Утверждено к печати Ученым советом ИЗК СО РАН

ISBN 978-5-6046471-0-3

© Коллектив авторов, 2021
© ИЗК СО РАН, 2021

От редактора

Данный сборник содержит тезисы докладов, представленных на рабочее совещание лаборатории орогенеза Института земной коры СО РАН, проходящего в п. Листвянка с 15 по 17 октября 2021 г. Лаборатория орогенеза создана в ноябре 2019 г. в рамках мегагранта Правительства РФ (проект № 075-15-2019-1883 «Орогенез: образование и рост континентов и суперконтинентов»). 31 декабря проект заканчивается, если не будет принято решение о его продлении еще на два года. В любом случае лаборатория орогенеза в Институте земной коры СО РАН останется и продолжит свою работу.

Изначальные цели проекта:

1. Создание нового высококласного центра геохронологии, геохимии и палеомагнетизма в Институте земной коры СО РАН.
2. Разработка на его базе палеогеографических моделей возникновения и роста Сибирского кратона в глобальном контексте, его коллизии с другими континентами, моделей орогенов и связанного с ними рудообразования, формирования и развития осадочных бассейнов и залежей углеводородов.

В целом эти задачи выполнены. По пункту 1 оборудованы и укомплектованы помещения для U-Pb датирования методом LA-ICPMS, химической пробоподготовки к ICPMS, для диагностики минералов и включений в них методом Рамановской спектроскопии, изотопного анализа воды, геохимических исследований методом рентгеновской флуоресценции, палеомагнитных исследований. По пункту 2 создана новая модель амальгамации Сибирского кратона и его дрейфа, предложены новые реконструкции суперконтинентов, исследована корреляция суперконтинентальных циклов с другими глобальными процессами, проведено исследование различных геологических объектов, выдвинуты новые гипотезы, относящиеся к орогенным процессам, развитию осадочных бассейнов и рудообразованию. По проекту опубликовано 34 статьи, из них 19 статей в журналах первого квартиля по Web of Science.

Целью проводимого рабочего совещания является смотр возможностей сотрудников лаборатории и участников проекта из других организаций, которые смогут очно присутствовать на совещании. По итогам совещания будет приниматься решение о направлениях исследований лаборатории орогенеза в 2022 – 2023 гг.

Всего на рабочее совещание представлено 18 докладов. Сами доклады будут транслироваться 16 октября 2021 г. начиная с 14-00. Подключение к конференции Zoom <https://zoom.us/j/98474877005?pwd=V25DdVJsY1loT3o2dXB2Rmc4SWNpQT09>

Идентификатор конференции: 984 7487 7005

Код доступа: 019203.

Отв. редактор, зав. лаборатории орогенеза

С.А. Писаревский



ЛАБОРАТОРИЯ
ОРОГЕНЕЗА
Институт земной коры СО РАН

Содержание	Стр.
Иванов А.В. Проблемы высокоточного датирования траппового магматизма	7
Пашкова Г.В., Мальцев А.С., Ревенко А.Г., Жиличева А.Н. Рентгенофлуоресцентный анализ в геологических исследованиях: возможности и опыт применения	8
Жиличева А.Н., Пашкова Г.В., Чубаров В.М., Марфин А.Е. Определение S, Fe, Cu, Ni и Se в сульфидных медно-никелевых рудах методом рентгенофлуоресцентного анализа с полным внешним отражением	9
Михеева Е.А., Блинов А.В. Геохимические особенности углей Иркутского бассейна	10
Шарыгин И.С. Развитие метода конфокальной Рамановской спектроскопии в лаборатории орогенеза Института земной коры СО РАН: итоги за первый год и планы	11
Гладкочуб Е.А., Шарыгин И.С., Иванов А.В., Беляев В.А. Включения метана в оливине из перидотитов Агардагского массива (юго-восток Тувы) по данным конфокальной Рамановской спектроскопии	12
Потапов С.В., Шарыгин И.С., Константинов К.М., Данилов Б.С. Состав расплавных включений в хромшпинелиде трубки Заполярная (Сибирский кратон) по данным конфокальной Рамановской спектроскопии	13
Дымшиц А.М., Дорогокупец П.И., Шарыгин И.С. Фазовые переходы в приложении к мантийной геодинамике: расчеты на основе уравнений состояния	14
Марфин А.Е., Шин Дин, Иванов А.В., Брзозовски М., Радомская Т.А., Пашкова Г.В., Каменецкий В.С., Белозерова О.Ю., Чубаров В.М., Якич Т.Ю., Дудкин Т.В. Вариации состава $\delta^{65}\text{Cu}$ и PGE в массивных и вкрапленных рудах месторождения Норильск 1 (Россия)	15
Габдрахимова Е.Р., Демонтерова Е.И., Сизов А.В., Пашкова Г.В., Клементьев А.М., Канева Е.В. Минералогические и геохимические данные для ископаемых костей миоценовых черепах (о. Ольхон, оз. Байкал, Россия)	16
Донская Т.В., Гладкочуб Д.П. Раннепротерозойские магматические породы с надсубдукционными геохимическими характеристиками в южной части Сибирского кратона	18
Кузнецов Н.Б. Результаты изучения детритового циркона из обломочных пород рифейских, вендских и палеозойских толщ запада Южного Урала	21
Романюк Т.В., Кузнецов Н.Б., Балугев А.С., Терехов Е.Н. Источники сноса рифейской терской свиты (Кандалакшский грабен, Беломорье)	22

Мотова З.Л., Донская Т.В., Гладкочуб Д.П. Вещественный состав и условия формирования терригенно-карбонатных пород мотской серии Иркутского Присяня	23
Гладкочуб Д.П., Донская Т.В. Роль орогенных процессов в формировании Ангара-Ленской нефтегазоносной области (Восточная Сибирь)	25
Демонтерова Е.И., Резницкий Л.З., Иванов А.В. Раннеордовикские сиениты Малобыстринского массива (Слюдянский кристаллический комплекс) как свидетельство постколлизийного растяжения	27
Скляр Е.В., Лавренчук А.В. Взаимодействие базитового и карбонатного расплавов в коллизийной системе Западного Прибайкалья	29
Аржанникова А.В., Демонтерова Е.И., Жоливе М., Михеева Е.А., Иванов А.В., Аржанников С.Г., Хубанов В.Б., Каменецкий В.С. Время закрытия центральной части Монголо-Охотского океана	30

Создание нового высококласного центра
геохронологии, геохимии и палеомагнетизма в
Институте земной коры СО РАН

Проблемы высокоточного датирования траппового магматизма

А.В. Иванов

Институт земной коры СО РАН, Иркутск

Высокоточное датирование в сочетании с палеомагнитными данными показывает, что магматизм большинства трапповых провинций протекал в геологически короткие промежутки времени (< 2 млн лет). В то же время в литературе, в том числе в ранних работах автора этого доклада, есть данные U-Pb и $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирования, говорящие о заметно большей длительности траппового магматизма. В докладе будут рассмотрены сложности U-Pb и $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирования, которые могут приводить как к кажущемуся омоложению, так и к задревнению датировок. Будут показаны методические сложности в $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ методе, связанные с неоднородностями стандартов, относительно которых рассчитывается возраст, с проблематичностью для низкокалийевых минералов коррекции на Са-генные изотопы аргона, образующиеся в результате облучения образца потоком быстрых нейтронов перед датированием. Также будут рассмотрены возможные причины нарушения и перезапуска К-Аг изотопных часов в результате постмагматических событий. Будут охарактеризованы особенности различных методов U-Pb датирования. В качестве примеров будут рассмотрены позднедевонская Якутск-Вилуйская провинция, позднепермская (лопинская) провинция Эмейшань, пермо-триасовая Сибирская провинция, раннеюрская провинция Кару-Феррар и мел-палеогеновая провинция Декан, по которым у автора имеется собственный опыт датирования. Будет показано, что U-Pb датирование единичных зерен циркона и бадделеита методом масс-спектрометрии с термической ионизацией и изотопным разбавлением (ID-TIMS) свидетельствует о короткой длительности магматизма. U-Pb датирование ID-TIMS по навескам различных зерен циркона, а также U-Pb датирование с использованием локальных методов (ионный зонд, лазерная абляция) обычно показывают широкий разброс датировок. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирование в ряде случаев показывает короткую, а в ряде случаев длинную историю магматизма трапповых провинций.

Рентгенофлуоресцентный анализ в геологических исследованиях: возможности и опыт применения

Г.В. Пашкова, А.С. Мальцев, А.Г. Ревенко, А.Н. Жиличева

Институт земной коры СО РАН, Иркутск

Начиная с 50-х гг. прошлого века рентгенофлуоресцентный анализ (РФА) широко используется при геологических и геохимических исследованиях благодаря возможности проведения высокопроизводительного многоэлементного анализа. Подготовка порошковых проб к РФА, как правило, заключается в прессовании таблетки-излучателя, либо применяется сплавление анализируемого материала с флюсом. В таком «традиционном» исполнении метод РФА занял прочное место в различных отраслях промышленности и науки.

Современные тенденции в развитии аппаратуры для РФА направлены на улучшение инструментальной чувствительности, спектрального разрешения и увеличение круга определяемых элементов. Рентгеновские спектрометры «нового поколения» значительно расширяют возможности РФА при анализе горных пород, почв, отложений и позволяют проводить количественные определения содержаний большей части элементов периодической таблицы. Помимо традиционного РФА появляются различные модификации метода, такие как РФА с полным внешним отражением (TXRF), РФА с поляризацией первичного излучения и РФА с капиллярной оптикой (μ -XRF). Вариант TXRF ориентирован главным образом на анализ жидкостей и микроколичеств твердых веществ; μ -XRF позволяет проводить локальный анализ и элементное картирование образцов. Одной из тенденций в развитии оборудования для РФА является миниатюризация спектрометров, создание портативных и настольных рентгеновских анализаторов, позволяющих проводить анализ проб без их разрушения. Как правило, современное оборудование укомплектовано «user-friendly» программным обеспечением, которое позволяет выбрать оптимальный способ коррекции матричных эффектов и избежать трудоемких градуировочных процедур.

В развитие теоретических и методических основ РФА значительный вклад внесла иркутская школа рентгеноспектрального анализа. В ИЗК СО РАН и ИГХ СО РАН постоянно ведутся разработки методик анализа разнообразных материалов. В последние годы в ИЗК СО РАН особое внимание уделяется развитию перспективного метода TXRF. Так, в рамках мегагранта Правительства России по проекту «Орогенез: образование и рост континентов и суперконтинентов» предложена новая методика многоэлементного анализа отдельных зерен апатита массой несколько мкг с использованием TXRF спектрометра.

В представленном докладе освещены основные тенденции в развитии аппаратуры для РФА, возможности применения при анализе геологических объектов, а также накопленный опыт применения метода для решения разнообразных задач в области геологии, геохимии, экологии, грунтоведения, археологии и др.

Определение S, Fe, Cu, Ni и Se в сульфидных медно-никелевых рудах методом рентгенофлуоресцентного анализа с полным внешним отражением

А.Н. Жиличева¹, Г.В. Пашкова¹, В.М. Чубаров², А.Е. Марфин¹

¹ *Институт земной коры СО РАН, Иркутск*

² *Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск*

Широко используемыми методами определения элементного состава сульфидных руд являются классические методы «мокрой химии» с применением титриметрического, гравиметрического, атомно-абсорбционного и спектрофотометрического анализа. Эти процедуры довольно трудоемкие. Использование метода рентгенофлуоресцентного анализа позволяет быстро и с высокой точностью определять широкий круг элементов в геологических образцах, однако при анализе сульфидных руд применение этого метода осложняется из-за недостатка стандартных образцов, адекватных по составу анализируемым пробам, а также матричных эффектов из-за высоких содержаний серы и рудных элементов. Использование рентгенофлуоресцентного анализа с полным внешним отражением (TXRF) при анализе руд позволяет избежать трудоемких градуировочных процедур и снизить влияние матричных эффектов, однако при прямом анализе на результаты TXRF значительно влияет размер частиц порошка и равномерность распределения внутреннего стандарта в пробе [1].

В данной работе представлены методические исследования, направленные на повышение точности прямого количественного определения Fe, Cu, Ni, S и Se в сульфидных медно-никелевых рудах Норильско-Талнахских месторождений (Россия). Выбор этих элементов для исследования обусловлен тем, что Ni и Cu являются основными рудными компонентами, добываемыми из сульфидных руд. Кроме этого, известное содержание Fe, Ni, Cu и S позволяет установить рудный состав и оценить, какие минералы присутствуют в пробе. Соотношение S/Se способствует определению вида процесса, который лежит в основе рудогенеза в сульфидных системах. Предварительное определение концентраций общего селена в пробах важно перед изучением изотопного соотношения $^{82}\text{Se}/^{76}\text{Se}$.

Измерения проводили на спектрометре S2 Picofox (Bruker Nano GmbH). Для достижения минимального размера частиц и получения стабильной суспензии предложено использовать мокрое измельчение сульфидных медно-никелевых руд. В стакан для измельчения помещали 20 г шариков (ZrO_2) диаметром 1 мм, 100 мг пробы, раствор Ga (внутренний стандарт) и очищенную воду. Измельчение проводили на вибрационной мельнице RETSCH MM 400 при частоте 20 Гц в течение 10 мин. Готовую суспензию отделяли от шариков при помощи сита, промывали дистиллированной водой. Объем суспензии вместе со смывами составлял 50 мл.

Результаты TXRF были сопоставлены с данными, полученными с помощью методик сравнения: гравиметрия для S, атомно-абсорбционная спектрометрия для Fe, Cu и Ni, метод изотопного разбавления для Se. Сделан вывод, что мокрое измельчение для подготовки суспензий значительно улучшило воспроизводимость и правильность результатов TXRF.

[1] Pashkova G.V., Chubarov V.M., Akhmetzhanov T.F., Zhilicheva A.N., Mukhamedova M.M., Finkelshtein A.L., Belozerova O.Y., 2020. Total-reflection X-ray fluorescence spectrometry as a tool for the direct elemental analysis of ores: Application to iron, manganese, ferromanganese, nickel-copper sulfide ores and ferromanganese nodules. Spectrochim. Acta B. 168. 105856.

Геохимические особенности углей Иркутского бассейна

Е.А. Михеева¹, А.В. Блинов²

¹ *Институт земной коры СО РАН, Иркутск*

² *Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск*

Иркутский угольный бассейн – крупная площадь развития отложений юрского возраста с промышленными залежами угля на юге Сибирской платформы. Отложения представлены континентальными осадками с выделением черемховской, присаянской и кудинской свит. Все угольные месторождения бассейна связаны с верхней подсвитой черемховской свиты (с нижней и верхней подсвитами). С целью оценки обогащения углей бассейна редкими элементами исследован Каратаевский разрез.

В северо-западной части Иркутского бассейна опробован Каратаевский угольный разрез (N 52°14'38.6" E 104°16'14.0"), примерно 27 км от р/п Залари. Юрские отложения в районе представлены обеими подсвитами черемховской свиты, мощностью до 200 м. Нижняя подсвита преимущественно грубозернистая, верхняя сложена песчаниками, алевролитами, аргиллитами, глинами, углисто-глинистыми сланцами и углем.

На исследованном разрезе прослеживается один угленосный горизонт. Угли ближе к подошве подменяются «углистыми сланцами». Угли Каратаевского разреза высокосернистые, прикровельная область пласта среднесернистая с сернистым «углистым сланцем». Зольность пласта изменяется схожим образом, самая низкозольная – основная часть пласта, в кровле пласта зольность увеличивается, самые высокие значения – в «углистом сланце». По результатам рентгеноструктурного анализа «углистый сланец» состоит из каолинита (около 85 %) с примесью кварца и смектита. Принимая во внимание геохимические особенности образца, следует воспринимать его как перспективный тонштейн (измененный вулканический пепел).

Геохимические данные, полученные для углей Каратаевского разреза, сопоставлены со средним составом мировых углей [1]. Для этого использовался коэффициент концентрации (K = отношение концентраций элементов в исследованных углях к мировому углю [1], предложен в работе [2]). По сравнению со средними значениями для мировых углей [1] угли Каратаевского месторождения слабо обогащены Sc, Ga, Y, U, Sm ($2 < K < 5$) и обогащены F, Cs, Th, Sb и Pb ($5 < K < 10$). Содержания Ge, As, Br, Rb, Sr, Zr, Nb, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Ba, La, Ce, Nd находятся в нормальном соотношении ($0.5 < K < 2$) к мировому углю [1]. Остальные элементы (F и Sn) в исследованном пласте обеднены ($K < 0.5$) по сравнению с мировыми углями [1].

Исследованные угли содержат достаточно высокие концентрации потенциально опасных элементов для окружающей среды. Пласт обогащен F, Y, Sb и Pb от кровли до подошвы. В основном повышенные концентрации элементов наблюдаются в кровельной части пласта и в предполагаемом тонштейне. Повышенные концентрации U, Th связаны в большей степени с предполагаемым тонштейном.

[1] Ketris M.P., Yudovich Y.E. Estimations of Clarkes for Carbonaceous biolithes: World averages for trace element contents in black shales and coals // International Journal of Coal Geology. 2009. V. 78. P. 135–148.

[2] Dai S., Seredin V.V., Ward et al. Enrichment of U–Se–Mo–Re–V in coals preserved within marine carbonate successions: geochemical and mineralogical data from the Late Permian Guiding Coalfield, Guizhou, China // Mineralium Deposita. 2015. V. 50. P. 159–186.

Развитие метода конфокальной Рамановской спектроскопии в лаборатории орогенеза Института земной коры СО РАН: итоги за первый год и планы

И.С. Шарыгин

Институт земной коры СО РАН, Иркутск

Конфокальная Рамановская спектроскопия – метод локального микроанализа вещества, который активно применяется в геологии для решения широкого спектра задач, в частности для диагностики минералов и изучения кристаллических, газовой-жидких и расплавных включений в минералах. Преимуществами метода являются: высокое пространственное разрешение ($<1\text{--}2$ мкм), быстрота анализа, неdestructивность, простота пробоподготовки и др. Использование моторизованного предметного столика позволяет проводить картирование образца по всем трем координатам (X, Y, Z) в любых их сочетаниях, что, в частности, дает информацию о распределении минералов в образце.

В лаборатории орогенеза ИЗК СО РАН в 2020 г. в рамках проекта «Орогенез. Образование и рост континентов и суперконтинентов» (мегагрант № 075-15-2019-1883 от Правительства Российской Федерации) была установлена система для конфокальной Рамановской спектроскопии WITec alpha 300R. Данная система (рисунок) состоит из конфокального микроскопа с моторизованной колонной для перемещения по оси Z и моторизованным предметным столиком, цветной цифровой видеокамеры обзорного канала, твердотельного лазера с длиной волны 532 нм (мощность излучения на выходе из лазера 30 мВт), спектрометра с тремя дифракционными решетками (300, 600 и 1800 штрихов/мм), охлаждаемого ПЗС-детектора, блока электронного управления, станции управления на базе ПК, джойстика управления. Микроскоп оборудован четырьмя микрообъективами: 10х/0.25, 50х/0.75, 50х/0.55 и 100х/0.90. Присутствуют осветители отраженного и проходящего света для обзора образца. Комплекс позволяет контролировать абсолютную мощность лазерного излучения с шагом 0.1 мВт. Для идентификации минералов по базе данных используется программа WITec TrueMatch.

В докладе будет представлена информация о проведенных исследованиях с использованием системы WITec alpha 300R и о планах развития метода конфокальной Рамановской спектроскопии в лаборатории орогенеза ИЗК СО РАН.



Система для конфокальной Рамановской спектроскопии WITec alpha 300R в лаборатории орогенеза ИЗК СО РАН.

Включения метана в оливине из перидотитов Агардагского массива (юго-восток Тувы) по данным конфокальной Рамановской спектроскопии

Е.А. Гладкочуб¹, И.С. Шарыгин¹, А.В. Иванов¹, В.А. Беляев²

¹ *Институт земной коры СО РАН, Иркутск*

² *Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск*

Агардагский массив (юго-восток Тувы, Центрально-Азиатский складчатый пояс) является частью позднедокембрийского (560 млн лет) офиолитового комплекса в шовной зоне между юго-западной окраиной Тувино-Монгольского микроконтинента и раннепалеозойскими островодужными террейнами. Перидотиты Агардагского массива представлены гарцбургитами (преобладают) и дунитами, в различной степени серпентинизированными. Высокая $Cr\#$ хромшпинели (0.59–0.83) перидотитов указывает на их принадлежность к надсубдукционным перидотитам [1].

В оливине перидотитов из Агардагского массива присутствуют включения, которые располагаются группами вдоль плоскостей. Размер индивидуальных включений не превышает 6 мкм. В пределах одной группы присутствуют включения с различным количеством фаз. Методом конфокальной Рамановской спектроскопии, с использованием системы WITec alpha 300R в лаборатории орогенеза ИЗК СО РАН, был изучен фазовый состав включений. Включения состоят из кристаллических фаз, среди которых диагностированы серпентин (антигорит и/или лизардит), брусит, графит и магнетит, и газовой фазы. В составе газовой фазы идентифицированы метан (преобладающий компонент) и азот.

Ранее сообщалось о находках подобных включений, содержащих метан, в оливине гарцбургитов Северного Тибета, также представляющих собой надсубдукционные перидотиты [2]. Авторы данной работы относят метансодержащие включения к флюидным и выделяют три типа включений по фазовому составу: 1) метан + антигорит + брусит + магнетит + магнезит; 2) метан + азот + лизардит ± брусит ± магнетит; 3) метан + антигорит + магнезит + графит ± магнетит ± доломит. Образование метана в перидотитах связывают с процессом их серпентинизации [2]. Предполагается, что образование различных типов метансодержащих включений в оливине гарцбургитов Северного Тибета происходило при различных условиях, в том числе мантийных [2]. Метансодержащие включения в оливине могут являться важным резервуаром abiогенного метана в перидотитах в составе складчатых областей [2].

На данном этапе исследований мы интерпретируем метансодержащие включения в оливине из перидотитов Агардагского массива как вторичные флюидные включения, располагающиеся вдоль залеченных трещин. Дальнейшие исследования позволят более детально охарактеризовать фазовый состав этих включений и установить P-T условия их образования.

[1] Pfänder J.A., Jochum K.P., Galer S.J.G., Hellebrand, E.W.G., Jung S., Kröner A. Geochemistry of ultramafic and mafic rocks from the northern Central Asian Orogenic Belt (Tuva, Central Asia) – constraints on lower and middle arc crust formation linked to late Proterozoic intra-oceanic subduction // *Precambrian Research*. 2021. V. 356. 106061.

[2] Zhang L., Wang Q., Ding X., Li W.-C. Diverse serpentinization and associated abiotic methanogenesis within multiple types of olivine-hosted fluid inclusions in orogenic peridotite from northern Tibet // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2021. V. 296. P. 1–17.

Состав расплавных включений в хромшпинелиде трубки Заполярная (Сибирский кратон) по данным конфокальной Рамановской спектроскопии

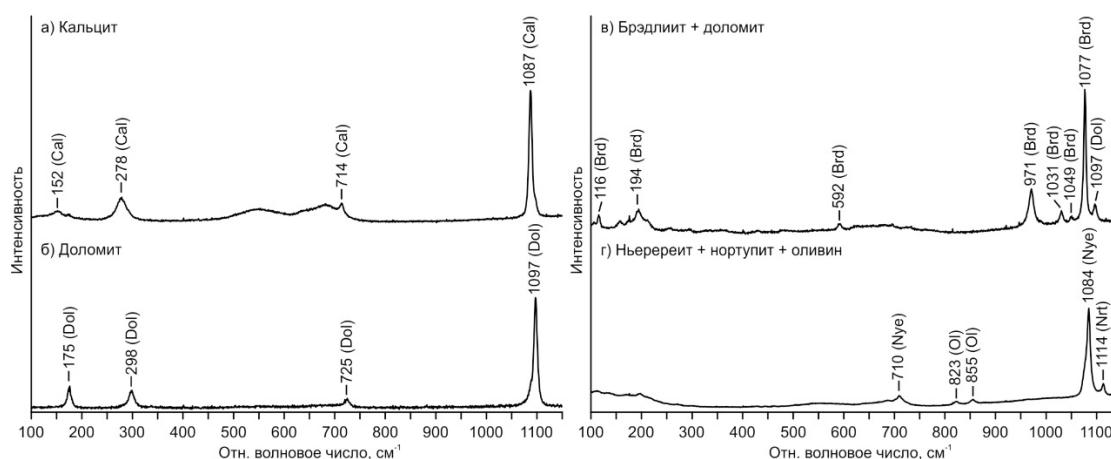
С.В. Потапов¹, И.С. Шарыгин, К.М. Константинов, Б.С. Данилов

Институт земной коры СО РАН, Иркутск

В данной работе представлены результаты исследований первичных раскристаллизованных расплавных включений в хромшпинелиде основной массы кимберлитов среднепалеозойской трубки Заполярная (Верхнемунское поле, Сибирский кратон).

В зернах хромшпинелида в плоскости полировки наблюдаются одиночные включения или несколько включений, располагающихся хаотично. Форма включений различная – изометричная, неправильная, вытянутая. Часто наблюдается ограниченная форма включений, соответствующая отрицательному кристаллу. Размер включений составляет до 20 мкм по длинной оси.

Методом конфокальной Рамановской спектроскопии, с использованием системы WITec alpha 300R в ИЗК СО РАН, среди дочерних минералов в раскристаллизованных расплавных включениях в хромшпинелиде были установлены оливин, апатит, кальцит (рисунок, а), доломит (рисунок, б), брэдлийит $\text{Na}_3\text{Mg}(\text{PO}_4)(\text{CO}_3)$ (рисунок, в) и щелочные карбонаты – ньеререит $(\text{Na},\text{K})_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$ и нортупит $\text{Na}_3\text{Mg}(\text{CO}_3)_2\text{Cl}$. Ньеререит характеризуется присутствием асимметричного сильного пика на $1083\text{--}1084\text{ см}^{-1}$ с плечом на $\sim 1072\text{--}1073\text{ см}^{-1}$ и слабого пика на $710\text{--}711\text{ см}^{-1}$ в Рамановских спектрах (рисунок, г), которые соответствуют колебаниям карбонат-иона. Пик на $1112\text{--}1114\text{ см}^{-1}$ в Рамановских спектрах (рис. 2г) соответствует наиболее интенсивному пику нортупита $\text{Na}_3\text{Mg}(\text{CO}_3)_2\text{Cl}$. Присутствие щелочных карбонатов было подтверждено методом сканирующей электронной микроскопии с энергодисперсионным микроанализом.



Рамановские спектры дочерних минералов из раскристаллизованных расплавных включениях в хромшпинелиде из кимберлитов трубки Заполярная. (а) – кальцит (Cal); (б) – доломит (Dol); (в) – брэдлийит (Brd) + доломит (Dol); (г) – ньеререит (Nye) + нортупит (Nrt) + оливин (Ol).

Присутствие кальцита, доломита и щелочных карбонатных минералов (ньеререит, нортупит и брэдлийит) в расплавных включениях в хромшпинелиде, являющемся одним из ранних минералов кимберлитов, свидетельствует о том, что родительский расплав кимберлитов трубки Заполярная был обогащен щелочами и CO_2 .

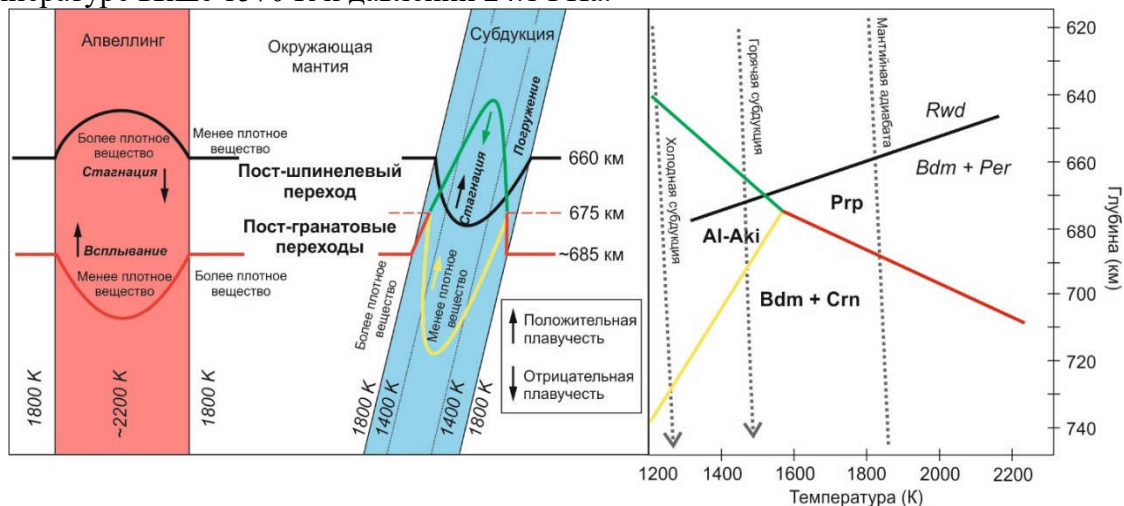
Фазовые переходы в приложении к мантийной геодинамике: расчеты на основе уравнений состояния

А.М. Дымишиц, П.И. Дорогокупец, И.С. Шарыгин

Институт земной коры СО РАН, Иркутск

Мантийная геодинамика во многом контролируется конвекцией, сопровождающейся подъемом вещества в горячих восходящих потоках и субдукцией холодных литосферных плит. Подъем и погружение мантийного вещества зависят от его плотности и на границе переходной зоны мантии и нижней мантии могут контролироваться фазовыми переходами с образованием бриджманита MgSiO_3 .

Используя свободную энергию Гельмгольца [1], нами было построено уравнение состояния пироба путем одновременной оптимизации литературных данных. На основе полученных данных для пироба, а также литературных данных для акимотоита, бриджманита и корунда были реконструированы фазовые переходы в системе $\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ при 22–28 ГПа путем расчета энергии Гиббса для реакций фазовых переходов (рисунок). Пироп переходит в ассоциацию бриджманит + корунд при температуре выше 1570 К и давлении 24.1 ГПа.



Схематическая иллюстрация изменения плавучести вещества в районах субдуцирующей океанической плиты (субдукция) и горячих восходящих потоков (апвеллинг), вызванного разными глубинами фазовых переходов в зависимости от температуры.

На глубинах около 640 км из-за образования Al-акимотоита плита приобретает отрицательную плавучесть и погружается глубже, но уже на 660 км в окружающей мантии стабилен бриджманит, в то время как в плите все еще устойчивы рингвудит и Al-акимотоит. Даже если предположить, что субдуцирующая плита еще какое-то время продвигается глубже, в окружающей мантии на глубине около 675 км Al-акимотоит переходит в бриджманитсодержащую ассоциацию, создавая еще большую положительную плавучесть в плите. Таким образом, погружение литосферной плиты на границе с нижней мантией становится невозможным из-за возникновения положительной плавучести (рисунок).

[1] Dorogokupets P.I., Dymshits A.M., Sokolova T.S., Danilov B.S., Litasov K.D. The equations of state of forsterite, wadsleyite, ringwoodite, akimotoite, MgSiO_3 -perovskite, and postperovskite and phase diagram for the Mg_2SiO_4 system at pressures of up to 130 GPa // Russian Geology and Geophysics. 2015. V. 56. P. 172–189.

Вариации состава $\delta^{65}\text{Cu}$ и PGE в массивных и вкрапленных рудах месторождения Норильск 1 (Россия)

А.Е. Марфин^{1,2}, Шин Дин³, А.В. Иванов¹, М. Брзозовски⁴, Т.А. Радомская², Г.В. Пашкова¹, В.С. Каменецкий¹, О.Ю. Белозерова², В.М. Чубаров², Т.Ю. Якич⁵, Т.В. Дудкин⁶

¹ *Институт земной коры СО РАН, Иркутск*

² *Институт геохимии им. А.П. Виноградова, Иркутск*

³ *Университет науки и технологии, Хефэй, Китай*

⁴ *Университет Лакхеда, Онтарио, Канада*

⁵ *Томский политехнический университет, Томск*

⁶ *«Норильскгеология», Норильск*

Магматические сульфидные медно-никелевые, с платиноидами (Cu-Ni-PGE), месторождения занимают значительное место в минерально-сырьевой базе РФ. Месторождение Норильск 1 – яркий представитель такого рода объектов. Оно локализовано на северо-западе Сибирской платформы и связано с одноименной интрузией трапповой формации. Мы исследовали вариации $\delta^{65}\text{Cu}$ (относительно стандарта NIST 976), измеренные *in situ* в халькопирите, и валовые концентрации элементов платиновой группы из этих же образцов. Исследование изотопного состава переходных металлов, в частности Cu, является новым аналитическим подходом, получившим широкое распространение в связи с внедрением мультиколлекторных масс-спектрометров. При этом нужно отметить, что для Cu наблюдаются значительные изотопные вариации, которые могут быть точно измерены [1].

Изученные образцы охватывают наиболее типичные сульфидные руды для месторождения Норильск 1 – вкрапленные, массивные и малосульфидные.

$\delta^{65}\text{Cu}$ в халькопирите демонстрирует большой разброс значений – от -0.39 до $+0.42$ ‰. Данные значения в целом совпадают со значениями $\delta^{65}\text{Cu}$ для дуговых и континентальных базальтов, которые лежат в диапазоне от -0.19 до $+0.47$ ‰ и от -0.18 до $+0.35$ ‰ соответственно [1]. Такой разброс объясняется обычно вовлечением корового материала с различными изотопными характеристиками меди [1]. Полученные нами данные демонстрируют более низкие значения $\delta^{65}\text{Cu}$, чем полученные ранее [2]. Валовые концентрации PGE не коррелирует с $\delta^{65}\text{Cu}$. Это, возможно, связано с более поздней ремобилизацией PGE в результате постмагматических процессов, регионального метаморфизма и т.д.

Полученный нами широкий диапазон значений $\delta^{65}\text{Cu}$ может свидетельствовать о вовлечении в процессы сульфидного рудогенеза корового источника, который мог быть ассимилирован трапповой магмой.

[1] Liu S.-A., Huang J., Liu J., Wörner G., Yang W., Tang Y.-J., Chen Y., Tang L., Zheng J., Li S. Copper isotopic composition of the silicate Earth // *Earth and Planetary Science Letters*. 2015. V. 427. P. 95–103.

[2] Malitch K.N., Latypov R.M., Badanina I.Y., Sluzhenikin S.F. Insights into ore genesis of Ni-Cu-PGE sulfide deposits of the Noril'sk Province (Russia): Evidence from copper and sulfur isotopes // *Lithos*. 2014. V. 204. P. 172–187.

Минералогические и геохимические данные для ископаемых костей миоценовых черепах (о. Ольхон, оз. Байкал, Россия)

Е.Р. Габдрахимова^{1, 2}, Е.И. Демонтерова², А.В. Сизов², Г.В. Пашкова²,
А.М. Клементьев², Е.В. Канева³

¹Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск

²Институт земной коры СО РАН, Иркутск

³Институт геохимии СО РАН им. А.П. Виноградова, Иркутск

Изучение минерального и химического состава ископаемых остатков животных позволяет исследовать условия их обитания и проводить палеоэкологическую и палеогеографическую реконструкцию региона. Костные остатки подвержены вторичным изменениям за счет условий их захоронения, что отражается на качестве геохимических и изотопных данных и их последующей интерпретации. В этой работе представлены предварительные аналитические результаты для ископаемых остатков черепах из осадочного разреза Тагай, расположенного на острове Ольхон, оз. Байкал. Местонахождение Тагай является самой северной точкой в Евразии [1 и ссылки в этой работе]. Осадочный комплекс представлен субгоризонтальными озерными отложениями тагайской свиты раннемиоценового возраста [1]. Остатки черепах встречены во всех костеносных горизонтах осадочного разреза и представлены фрагментами панцирей пресноводных черепах вида *Baicalemys gracilis* [2]. Фрагменты чешуек черепах имеют размер от 8 до 22 мм и часто – зазубренный край. Цвет обломков – от молочно-белого до коричневатого к черному, встречаются чешуйки голубого цвета. Результаты полуколичественного рентгенофлуоресцентного анализа показали, что кости черепах миоценового возраста в преобладающем количестве состоят из CaO (51–55 мас. %) и P₂O₅ (17–30 мас. %). Различия в процентном содержании тех или иных элементов в костях черепах разного цвета минимальны. Оксиды главных элементов: SiO₂ (0.6–2.0 мас. %), Al₂O₃ (0.4–2.4 мас. %), Na₂O (0.3–0.8 мас. %), MnO (0.15–1.3 мас. %), Fe₂O₃ (0.2–1.1 мас. %). Примесные элементы Cu, K и Mg – менее 1 мас. %. Содержание в костях C и F составляет 7.2–15 мас. % и 0.4–2.1 мас. % соответственно. В работе [3] исследованы ископаемые кости черепах рода *Testudo*, где основным минералом является франколит (карбонат-фторапатит). Геохимический состав костей черепахи рода *Testudo* и черепахи рода *Baicalemys* из разреза Тагай близок по содержанию главных элементов, но отличается по содержанию примесных. Кости черепах рода *Baicalemys* более обогащены Mg, Al, Mn и Sr. Предварительный анализ дифрактограмм показал, что все образцы более всего соответствуют структуре фторапатита. Предполагается сопоставить данные о структурных изменениях костных остатков с данными по минеральному и микроэлементному составу, что позволит оценить характер диагенетических изменений после гибели черепах вида *Baicalemys gracilis*.

[1] Klementiev A.M., Sizov A.V. New record of anchithere (*Anchitherium aurelianense*) in the Miocene of Eastern Siberia, Russia // Russian Journal of Theriology. 2015. Vol. 14(2). P. 133–143.

[2] Хозацкий Л. И., Чхиквадзе В. М. Новые данные о миоценовых черепахах рода *Baicalemys*. Сообщ. АН Грузии. 1993. Т. 148, № 3. С. 155–160.

[3] Elorza J., Astibia H., Murelaga X., Pereda-Suberbiola X. Francolite as a diagenetic mineral in dinosaur and other Upper Cretaceous reptile bones (Lano, Iberian Peninsula): microstructural, petrological and geochemical features // Cretaceous Res. 1999. V. 20. P. 169–187.

Разработка палеогеографических моделей возникновения и роста Сибирского кратона в глобальном контексте, его коллизии с другими континентами, моделей орогенов, рудообразования, формирования и развития осадочных бассейнов и залежей углеводородов

Раннепротерозойские магматические породы с надсубдукционными геохимическими характеристиками в южной части Сибирского кратона

Т.В. Донская, Д.П. Гладкочуб

Институт земной коры СО РАН, Иркутск

Сибирский кратон в качестве единой структуры был сформирован в раннем протерозое на временном интервале 2.00 – 1.87 млрд лет [1]. Однако первые события, приведшие к формированию Сибирского кратона, можно отсчитывать с начала процессов субдукции под Олекмо-Алданский и Анабарский архейские континентальные блоки на временном интервале 2.06 – 2.00 млрд лет. Индикаторами этих событий являются магматические комплексы, формирующиеся в надсубдукционной обстановке, которые располагаются в современной структуре Сибирского кратона в его южной и юго-восточной части, а именно в Голоустенском и Чуйском блоках Байкальского выступа, в Чара-Олекминском, Западно-Алданском и Батомгском блоках Алданского щита. В Байкальском выступе подобные образования представлены гранитоидами с возрастом около 2.02 млрд лет [2–4], а в Маганском террейне Анабарского супертеррейна – гранодиоритами с возрастом 2.00 млрд лет [5]. На Алданском щите с субдукционным этапом ассоциируют метавулканиды Балаганахского зеленокаменного пояса с возрастом 2.06 – 2.05 млрд лет [6], габбро и гранитоиды унгринского комплекса (2.04 – 2.02 млрд лет [7, 8]), плагиогнейсы тимптонского комплекса (2.01 млрд лет [8]), метавулканиды федоровской толщи (2.01 млрд лет [9]), а также диориты джагдаканского комплекса и гранитоиды хоюндиного комплекса Батомгского блока с возрастом 2.06 млрд лет [10, 11].

Анализ составов надсубдукционных гранитоидов и вулканитов южной части Сибирского кратона показал, что все эти породы близки гранитам *I*-типа (обзор в [1]). Большинство магматических пород с надсубдукционными геохимическими характеристиками имеют положительные значения $\epsilon_{Nd}(t)$ и были сформированы в результате плавления раннепротерозойской ювенильной континентальной коры, в существенно меньших количествах присутствуют породы с незначительными отрицательными величинами $\epsilon_{Nd}(t)$ [1, 3, 8 и др.].

Совокупность данных по магматическим породам с надсубдукционными геохимическими характеристиками с возрастом 2.06 – 2.00 млрд лет позволяет предполагать развитие на этом временном интервале активных континентальных окраин Анабарского континентального блока с сопряженными с ним островными дугами и Олекмо-Алданского континентального блока совместно с Федоровской островной дугой, а также формирование Батомгской островной дуги [1, 8, 11, 12]. В дальнейшем, на временном интервале 2.0 – 1.9 млрд лет, в ходе аккреционно-коллизионных событий, приведших к формированию Сибирского кратона, все островные дуги и фрагменты активных континентальных окраин с надсубдукционными магматическими образованиями вошли в структуру кратона.

Несмотря на то, что к временному рубежу 1.87 млрд лет сборка Сибирского кратона завершилась, влияние предшествующих субдукционных событий продолжилось вплоть до финальной стадии становления кратона. В частности, надсубдукционные метки были зафиксированы в магматических породах основного состава Южно-Сибирского постколлизионного магматического пояса. Этот пояс был сформирован в южной части Сибирского кратона на временном интервале 1.88 – 1.84 млрд лет и фиксирует окончательную стадию становления кратона [1]. Магматические породы основного состава Южно-Сибирского постколлизионного магматического пояса в той

части этого пояса, где они пересекают надсубдукционные комплексы с возрастом 2.06 – 2.00 млрд лет, имеют геохимические характеристики пород, сформированных за счет мантийных источников, содержащих субдукционный компонент. Кроме того, все эти породы обнаруживают близкие отрицательные значения $\epsilon_{Nd}(t)$ в диапазоне от –4.3 до –11.2 [3, 13, 14]. Таким образом, можно предполагать, что большая часть магматических пород основного состава Южно-Сибирского постколлизийного магматического пояса могла быть образована за счет плавления субконтинентальной литосферной мантии, преобразованной под влиянием предшествующих субдукционных процессов палеопротерозоя.

- [1] Donskaya T.V. Assembly of the Siberian Craton: Constraints from Paleoproterozoic granitoids // *Precambrian Research*. 2020. V. 348. 105869.
- [2] Poller U., Gladkochub D., Donskaya T., Mazukabzov A., Sklyarov E., Todt W. Multistage magmatic and metamorphic evolution in the Southern Siberian Craton: Archean and Palaeoproterozoic zircon ages revealed by SHRIMP and TIMS // *Precambrian Research*. 2005. V. 136. P. 353–368.
- [3] Неймарк Л.А., Ларин А.М., Немчин А.А., Овчинникова Г.В., Рыцк Е.Ю. Геохимические, геохронологические (U-Pb) и изотопные (Pb, Nd) свидетельства анорогенного характера магматизма Северо-Байкальского вулcano-плутонического пояса // *Петрология*. 1998. Т. 6, № 4. С. 139–164.
- [4] Донская Т.В., Гладkochуб Д.П., Мазукабзов А.М., Пресняков С.Л., Баянова Т.Б. Палеопротерозойские гранитоиды чуйского и кутимского комплексов (юг Сибирского кратона): возраст, петрогенезис и геодинамическая природа // *Геология и геофизика*. 2013. Т. 54, № 3. С. 371–389.
- [5] Попов Н.В., Сафонова И.Ю., Постников А.А., Терлеев А.А., Комия Ц., Токарев Д.А. Палеопротерозойские гранитоиды из фундамента центральной части Сибирской платформы (скважина Могдинская-6): U-Pb возраст и состав // *Доклады Академии наук*. 2015. Т. 461, № 5. С. 558–562.
- [6] Анисимова И.В., Котов А.Б., Глебовицкий В.А., Сальникова Е.Б., Яковлева С.З., Великославинский С.Д., Загорная Н.Ю. Возрастные границы и продолжительность формирования раннепротерозойских вулканических поясов центральной части Алданского щита // *Доклады Академии наук*. 2006. Т. 406, № 3. С. 355–360.
- [7] Бибикова Е.В., Грачева Т.В., Дук В.Л., Кицул В.И., Макаров В.А. Изотопный возраст унгринского магматического комплекса Алданского щита // *Доклады АН СССР*. 1984. Т. 276, № 1. С. 206–209.
- [8] Котов А.Б. Граничные условия геодинамических моделей формирования континентальной коры Алданского щита. Диссертация в виде научного доклада докт. геол.-мин. наук. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2003. 78 с.
- [9] Великославинский С.Д., Котов А.Б., Сальникова Е.Б., Глебовицкий В.А., Ковач В.П., Загорная Н.Ю., Беляевский Н.А., Яковлева С.З., Федосеенко А.М. U-Pb возраст федоровской толщи Алданского гранулитогнейсового мегакомплекса (Алданский щит) // *Доклады Академии наук*. 2003. Т. 393, № 1. С. 91–96.
- [10] Мишкин М.А., Ленников А.М., Баянова Т.Б., Вовна Г.М., Сахно В.Г., Октябрьский Р.А., Бадрединов З.Г. Первые результаты U-Pb геохронологических исследований докембрийских гранитоидов Батомгского блока Алданского щита // *Тихоокеанская геология*. 2010. Т. 29, № 3. С. 45–49.
- [11] Гурьянов В.А., Диденко А.Н., Песков А.Ю., Роганов Г.В., Дымович В.А. Раннедокембрийские гранитоиды Батомгского выступа фундамента юга-востока Сибирской платформы: возраст и геодинамическая обстановка формирования // *Тихоокеанская геология*. 2016. Т. 35, № 3. С. 23–44.

- [12] Донская Т.В., Гладкочуб Д.П., Мазукабзов А.М., Лепехина Е.Н. Возраст и источники палеопротерозойских дометаморфических гранитоидов Голоустенского блока Сибирского кратона: геодинамические следствия // Петрология. 2016. Т. 24, № 6. С. 587–606.
- [13] Гонгальский Б.И., Суханов М.К., Гольцман Ю.В. Sm-Nd изотопная система Чинейского анортозит-габбро-норитового плутона (Восточное Забайкалье) // Проблемы геологии рудных месторождений, минералогии, петрологии и геохимии. М.: ИГЕМ РАН, 2008. С. 57–60.
- [14] Шоханова М.Н., Донская Т.В., Гладкочуб Д.П., Мазукабзов А.М., Падерин И.П. Палеопротерозойские базальтоиды Северо-Байкальского вулканоплутонического пояса Сибирского кратона: возраст и петрогенезис // Геология и геофизика. 2010. Т. 51, № 8. С. 1049–1072.

Результаты изучения детритового циркона из обломочных пород рифейских, вендских и палеозойских толщ запада Южного Урала

Н.Б. Кузнецов

Геологический институт РАН, Москва

Запад Южного Урала – это область распространения преимущественно осадочных образований, занимающих гигантский стратиграфический объем. Продолжительность формирования этой последовательности ~ 1.5 млрд лет – от времени накопления базальных уровней разреза нижнерифейской айской свиты (около 1750 млн лет) до окончания времени накопления верхнепермской красноцветной молассы (около 250 млн лет). Нижняя часть этой стратиграфической последовательности представлена в пределах Башкирского поднятия (БП), расположенного к западу от Зюраткульского разлома сегмента Башкирского антиклинория, и известна как типовые разрезы рифея. Базальные элементы разреза рифея, суммарная мощность которого по некоторым оценкам достигает 10 км, на севере БП со структурным несогласием налегают на архейско-раннепротерозойский тараташский гранитометаморфический комплекс. Выше разреза рифея с параллельным несогласием залегает терригенно-глинистая толща (мощностью до 1.5 км), выделяемая как ашинская серия верхнего венда – нижнего кембрия. Верхи разреза ашинской серии с параллельным несогласием перекрыты палеозойским разрезом. Верхние стратиграфические элементы разреза соответствуют кунгурскому ярусу нижней перми. Выше с резким структурным несогласием залегают верхнепермские терригенные (часто грубообломочные) красноцветы. Все эти рифейско-палеозойские стратифицированные образования слагают реликты Восточно-Башкирского осадочного бассейна (ВББ).

На разных уровнях рифейской, ашинской и палеозойской части сводного стратиграфического разреза ВББ залегают песчаники. Для 12 проб из песчаников разных стратиграфических уровней этого разреза выполнено U-Pb-изотопное датирование зерен детритового циркона (dZr). Эти данные свидетельствуют о том, что в раннем, среднем и начале позднего рифея кластика в ВББ поступала со стороны Восточно-Европейской платформы (ВЕП), преимущественно из «балтийских источников». Непосредственно перед накоплением ашинской серии произошла существенная палеогеографическая перестройка, результатом которой стала кардинальная смена направления поступления обломочного материала, аккумулированного в ВББ. В ашинское время полимиктовый обломочный материал стал поступать с востока, т.е. из «небалтийского» источника. Но в позднем ордовике направление седиментационных потоков в ВББ опять изменилось и материал стал поступать с ВЕП, где в ее Волго-Уральской области происходило воздымание и выветривание стратиграфических и вещественных аналогов ашинской серии. К эмскому веку на локальных поднятиях в Волго-Уральской области ВЕП стратиграфические и вещественные аналоги ашинской серии были полностью размыты, и на эрозионный срез были выведены раннедокембрийские кристаллические комплексы, а также рифейские толщи, сложенные продуктами размыва этих комплексов. Переотложенные продукты их размыва были аккумулярованы в виде кварцевых песчаников такатинской свиты.

Перестройки седиментационных потоков хорошо согласуются с наиболее важными геотектоническими событиями, проявленными на разных этапах позднедокембрийской и палеозойской эволюции Уральской периферии ВЕП.

Источники сноса рифейской терской свиты (Кандалакшский грабен, Беломорье)

Т.В. Романюк¹, Н.Б. Кузнецов², А.С. Балугев², Е.Н. Терехов²

¹ Институт физики Земли РАН, Москва

² Геологический институт РАН, Москва

Терригенные толщи рифея в Беломорском регионе обнажены на очень ограниченном пространстве: на южном побережье Кольского полуострова, на п-овах Средний и Рыбачий и в небольших выходах вдоль северо-восточного побережья Кольского п-ова. Это синрифтовые толщи, выполняющие грабены палеорифтовой системы Белого моря (РСБМ), заложенной в фундаменте северной части Восточно-Европейской платформы. Мощность рифея в пределах грабенов по сейсмическим данным от 1.5 до 8 км. Большая часть РСБМ перекрыта венд-палеозойским платформенным чехлом (Мезенская синеклиза) и водами Белого и Баренцева морей [1].

Несмотря на более чем полувековую историю изучения РСБМ, время ее заложения и характер эволюции, а также корреляция выполняющих грабен комплексов до сих пор дискуссионны. В последние годы получен ряд новых геохронологических данных для минералов и пород терской свиты [2, 3]. Это U-Pb изотопные возрасты зерен детритового циркона (dZr), дополненные результатами геохимического и изотопного Sm-Nd изучения пород. Результатами U-Pb изотопного датирования dZr, извлеченных из пробы, отобранной из терригенных пород терской свиты, обнаженных в правом борту нижнего течения р. Кашкаранского, определен средневзвешенный возраст 1145 ± 20 млн лет по четырем наиболее молодым датировкам dZr из терской свиты. Это означает, что часть разреза терской свиты, залегающая выше изученного уровня, не может быть древнее конца среднего рифея и ограничивает время накопления синрифтовых отложений Кандалакшского грабена РСБМ. Терская свита была сформирована преимущественно за счет накопления продуктов размыва комплексов, слагающих борта Керецкого и Кандалакшского грабенов и, в том числе, эрозионных продуктов известных в Беломорье эклогитовых комплексов. Идентифицированы также специфические первичные источники – базиты с возрастом $\sim 2.7\text{--}2.9$ и $\sim 2.4\text{--}2.5$ млрд лет. Последние являются частью очень редкой по миру раннепротерозойской магматической и метаморфической активизации, проявленной в пределах структур, представленных в современном строении Балтийского щита. Те dZr из терской свиты, для которых нет потенциальных близких первичных источников, не были привнесены издалека, а были рециклены из местных древних осадочных образований.

[1] Балугев А.С., Журавлев В.А., Терехов Е.Н., Пржиялговский Е.С. Тектоника Белого моря и прилегающих территорий (Объяснительная записка к «Тектонической карте Белого моря и прилегающих территорий» масштаба 1:1500000). Тр. ГИН РАН. Вып. 597. М.: ГЕОС, 2012. 104 с.

[2] Балугев А.С., Колодяжный С.Ю., Терехов Е.Н., Лебедев В.А., Серов П.А. Проблемы времени заложения и тектонической эволюции Онежско-Кандалакшского палеорифта в свете данных изотопной геохронологии // Известия ВУЗов. Геология и разведка. 2018. № 5. С. 5–11.

[3] Кузнецов Н.Б., Балугев А.С., Терехов Е.Н., Колодяжный С.Ю., Пржиялговский Е.С., Романюк Т.В., Дубенский А.С., Шешуков В.С., Ляпунов С.М., Баянова Т.Б., Серов П.А. О времени формирования Кандалакшского и Керецкого грабенов палеорифтовой системы Белого моря в свете новых данных изотопной геохронологии // Геодинамика и тектонофизика. 2021. № 3. С. 570–607.

Вещественный состав и условия формирования терригенно-карбонатных пород мотской серии Иркутского Присяянья

З.Л. Мотова, Т.В. Донская, Д.П. Гладкочуб

Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск

Терригенно-карбонатные породы мотской серии протягиваются узкой полосой вдоль предгорьев Восточного Саяна и относятся к присаянскому региональному стратиграфическому горизонту [1]. В составе мотской серии выделяются хужирская, шаманская и иркутская свиты [1, 2], они с несогласием залегают на нижневендских терригенных отложениях олхинской свиты [3, 4] и перекрываются соленосными карбонатными породами усольской свиты кембрия [5]. С целью выявления особенностей седиментационной структуры и литофациальной изменчивости, а также определения условий и времени осадконакопления авторами были проведены литолого-фациальные, литохимические и U-Pb (LA-ICP-MS) геохронологические исследования терригенных пород мотской серии, выходящих на дневную поверхность в обнажении «Шаманский Утес» (д. Шаманка Шелеховского района Иркутской области).

В ходе проведенных исследований было установлено, что породы, слагающие нижнюю часть разреза «Шаманский Утес», представлены песчаниками. Средняя часть разреза сложена песчанистыми доломитами. Завершают разрез доломиты иркутской свиты. По своим вещественным характеристикам терригенные породы соответствуют аркозам. Генетическая типизация, выполненная с применением петрохимических модулей, свидетельствует о том, что эти аркозы сложены продуктами разрушения магматических и метаморфических пород. Выявлено постепенное увеличение карбонатной составляющей в вещественном составе терригенно-карбонатных пород верхних частей разреза. В разрезе «Шаманский Утес» выделено 32 литологические пачки и восемь литолого-генетических типов отложений. Литолого-фациальные особенности пород шаманской свиты свидетельствуют о том, что они накапливались в условиях приливно-отливного побережья. Литолого-фациальные особенности пород иркутской свиты свидетельствуют о спокойном тектоническом режиме осадконакопления без поступления обломочного материала, что способствовало массовому появлению кембрийской фауны, детально охарактеризованной в работе [6]. Возраст самого молодого детритового циркона из песчаника шаманской свиты близок основному возрастному пику, полученному В.В. Марусиным и др. [6] по детритовым цирконам из пород иркутской свиты, что позволяет ограничить максимальный возрастной предел накопления этих толщ не древнее 530 млн лет (томмотский ярус кембрия). В целом, совокупность полученных данных позволяет предположить, что снос обломочного материала в бассейн седиментации пород иркутской и шаманской свит происходил преимущественно с орогена, возникшего в результате вендских аккреционно-коллизионных событий, проявленных в южном складчатом обрамлении Сибирской платформы.

[1] Решения Всесоюзного стратиграфического совещания по докембрию, палеозою и четвертичной системе Средней Сибири. Ч. 1 (Верхний протерозой и нижний палеозой). Новосибирск, 1983. 215 с.

[2] Махлаев М.Л. Легенда Ангара-Енисейской серии Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1:1 000 000 (третье издание) Книга 1. Красноярск, 2002.

- [3] Шенфиль В.Ю. Поздний докембрий Сибирской платформы. Новосибирск: Наука, 1991. 183 с.
- [4] Советов Ю.К. Верхнедокембрийские песчаники юго-запада Сибирской платформы. Новосибирск: Наука, 1977. 295 с.
- [5] Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Кембрий Сибирской платформы: в 2 т. Т.1: Стратиграфия / С.С. Сухов и др. Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2016. 497 с.
- [6] Marusin V.V., Kolesnikova A.A., Kochnev B.B., Kuznetsov N.B., Pokrovsky B.G., Romanyuk T.V., Karlova G.A., Rud'ko S.V., Shatsillo A.V., Dubenskiy A.S., Sheshukov V.S., Lyapunov S.M. Detrital zircon age and biostratigraphic and chemostratigraphic constraints on the Ediacaran–Cambrian transitional interval in the Irkutsk Cis–Sayans Uplift, southwestern Siberian Platform // *Geological Magazine*. 2020. <https://doi.org/10.1017/S0016756820001132>.

Роль орогенных процессов в формировании Ангаро-Ленской нефтегазоносной области (Восточная Сибирь)

Д.П. Гладкочуб, Т.В. Донская

Институт земной коры СО РАН, Иркутск

Уникальной особенностью залежей нефти и газа Восточной Сибири является их позднедокембрийский возраст. Еще в первой половине прошлого века возможность обнаружения столь древних углеводородов в Сибири была предсказана академиком АН СССР А.А. Трофимуком [1]. Наиболее показательным примером залежей докембрийских углеводородов в Восточной Сибири являются месторождения Ангаро-Ленской области нефтегазонакопления (НГО). Площадь Ангаро-Ленской НГО составляет 230 тыс. км², ее начальные геологические ресурсы углеводородов оцениваются более чем в 6 млрд т, при том, что начальные ресурсы свободного газа составляют более 5.5 трлн м³.

Основные ресурсы и запасы углеводородов в Ангаро-Ленской НГО сосредоточены в вендском терригенном комплексе, а именно в его парфеновском горизонте, который соответствует нижнемотскому нефтегазоносному комплексу тирского горизонта чорской свиты мотской серии. Мощность парфеновского горизонта на Ковыктинском месторождении составляет от 40 до 80 м. Седиментация отложений свиты происходила преимущественно в аллювиальных (русовых) условиях, а также в обстановках приливно-отливной равнины и мелководного шельфа, редко баров [2]. В целом, вся южная часть Сибирской платформы, и в том числе Ангаро-Ленская ступень и примыкающее к ней юго-западное окончание Непско-Ботуобинской антеклизы, во время накопления отложений чорской свиты представляла собой прибрежную равнину, периодически заливавшуюся морем [3]. По характеру битуминозности и геохимическим показателям нижнемотский терригенный комплекс, вмещающий парфеновский продуктивный горизонт, был описан как способный накапливать углеводороды, а не генерировать углеродистое вещество [4]. Таким образом, объяснить скопление столь колоссальных объемов углеводородов в русловых отложениях и в мелководных отложениях прибрежно-морского типа на значительном удалении от края платформы, а по сути, во внутренней области платформы, их накоплением *in situ* не представляется возможным в рамках гипотезы об органической природе углеродистого вещества.

Проведенный анализ геодинамической истории южной окраины Сибирской платформы и прилегающих областей в докембрии наглядно показал, что до появления в позднем неопротерозе (венде) «южносибирской» пассивной окраины Палеоазиатского океана в пределах рассматриваемой территории не существовало условий (бассейнов), в которых было бы возможным накопление гигантских объемов докембрийских углеводородов Ангаро-Ленской НГО [5]. С учетом того, что к отложениям пассивных окраин и бассейнов форланда приурочено соответственно 47.7 и 46.4 % мировых запасов углеводородов [6], представляется достаточно обоснованным, что предлагаемая гипотеза может логично объяснить природу происхождения углеводородов, локализованных в рассматриваемой группе месторождений Ангаро-Ковыктинской зоны нефтегазонакопления Ангаро-Ленской НГО.

Отдельно стоит отметить определяющую роль орогенных процессов позднего докембрия – раннего палеозоя, проявившихся на ранних стадиях формирования Центрально-Азиатского орогенного пояса, способствовавших миграции углеводородов из отложений пассивной окраины и бассейнов форланда во внутренние области южного фланга Сибирской платформы и формированию серии крупных месторождений. В

качестве аргумента в поддержку этой гипотезы следует подчеркнуть, что свидетельства «западной» реннепалеозойской миграции деформаций от края платформы в ее внутренние области достаточно хорошо изучены и представлены шарьяжами, надвигами, а также складчатостью и проявлением синтектонического метаморфизма (обзор в [7]).

- [1] Трофимук А.А. Нефтегазоносность Сибирской платформы // Геология и геофизика. 1960. Т. 7, № 1. С. 3–11.
- [2] Пушкарева М.М., Хабаров Е.М., Вараксина И.В. Литологическая характеристика парфеновского и ботуобинского продуктивных горизонтов венда Ангаро-Ленской ступени и Непско-Ботуобинской антеклизы // Известия Томского политехнического университета. 2013. Т. 323, № 1. С. 78–83.
- [3] Мельников Н.В., Шемин Г.Г., Ефимов А.О. Палеогеография венда Сибирской платформы // Палеогеография фанерозоя Сибири. Новосибирск: СНИИГГиМС, 1989. С. 3–10.
- [4] Самсонов В.В., Ларичев А.И., Чеканов В.И., Соловьев В.В. Особенности геологического строения нефтегазовых комплексов и оценка перспектив нефтегазоносности южной части Сибирской платформы // Геология и геофизика. 2010. Т. 51, № 11. С. 1545–1564.
- [5] Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Stanevich A.M., Pisarevsky S.A., Zhang S., Motova Z.L., Mazukabzov A.M., Li H. U-Pb detrital zircon geochronology and provenance of Neoproterozoic sedimentary rocks in southern Siberia: New insights into breakup of Rodinia and opening of Paleo-Asian Ocean // Gondwana Research. 2019. V. 65. P. 1–16.
- [6] Pang X.Q., Jia C.Z., Wang W.Y. Petroleum geology features and research developments of hydrocarbon accumulation in deep petroliferous basins // Petroleum Science. 2015. V. 12. P. 1–53.
- [7] Зорин Ю.А., Мазукабзов А.М., Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Пресняков С.Л., Сергеев С.А. Силурийский возраст главных складчатых деформаций рифейских отложений Байкало-Патомской зоны // Доклады Академии наук. 2008. Т. 463, № 2. С. 429–434.

Раннеордовикские сиениты Малобыстринского массива (Слюдянский кристаллический комплекс) как свидетельство постколлизийного растяжения

Е.И. Демонтерова, Л.З. Резницкий, А.В. Иванов

Институт земной коры СО РАН, Иркутск

Слюдянский кристаллический комплекс, примыкает к южной оконечности Сибирского кратона, является фрагментом единой аккреционно-коллизийной системы раннекаледонского возраста. Сложен породами гранулитовой фации метаморфизма, возраст которого определен по цирконам из гнейсов слюдянской серии култуковской свиты [1]. Для цирконов с ордовикским возрастом обосновывается их метаморфическая природа, а полученный интервал значений соответствует 480–495 млн лет с пиком на 487 млн лет. Толщи метаморфического комплекса прорваны интрузивными породами гранит-сиенитового состава с возрастом 511–450 млн лет [2]. Малобыстринский массив является наиболее крупным магматическим телом, сложенным разнообразными сиенитами, в меньшей степени – монцонитами и гранитами.

На Малобыстринском массиве задокументированы сиениты с андрадитовым гранатом, которые хорошо подходят для датирования Sm-Nd методом, благодаря присутствию в них граната. Фигуративные точки минералов и вала образуют изохрону, наклон которой составляет 481.9 ± 10 млн лет ($СКВО=0.63$). Полученные значения $\varepsilon Nd_T -3.8 \dots -4.2$ и $\varepsilon Sr_T 25.0 - 25.8$ для святоноситов попадают в область распространения I-типа гранитов, что указывает на магматическую природу их происхождения. Использование диагностических диаграмм [3] для установления геодинамической природы изучаемых пород, таких как Rb-Y+Nb, Nb-Y, и отсутствие отрицательных аномалий Nb-Ta показывают, что выплавки образовались во внутриплитных условиях или при переплавлении пород с внутриплитными характеристиками. Пологие редкоземельные спектры от Gd до Lu указывают на отсутствие граната в источнике плавления.

Внутриплитная природа сиенитовых магм, незначительный отрыв по возрасту после пика метаморфизма и отсутствие граната в источнике плавления говорят о возникновении магм на коровом уровне в условиях постколлизийного растяжения. Плавление на коровом уровне может быть объяснено моделью, предложенной в статье [4], в которой показано, что при коллизийных процессах, вызывающих тектоническое сжатие осадочных толщ, существует обратная связь между температурой и температуропроводностью. Через несколько десятков миллионов лет после разогрева коры ее нижняя часть дополнительно нагревается из-за того, что тепло не успевает отводиться в верхние горизонты, и ее температура в итоге превышает солидус метаморфических сланцев и приводит к их плавлению.

[1] Kovach V., Salnikova E., Wang K.-L. et al., Zircon ages and Hf isotopic constraints on sources of clastic metasediments of the Slyudyansky high-grade complex, southeastern Siberia: Implication for continental growth and evolution of the Central Asian Orogenic Belt // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2013. V. 62. P. 18–36.

[2] Резницкий Л.З., Котов А.Б., Сальникова Е.В. и др., Возраст и продолжительность формирования флогопитовых и лазуритовых месторождений Южного Прибайкалья: результаты U-Pb геохронологических исследований // *Петрология*. 2000. Т. 8. С. 74–86.

[3] Pearce J.A., Harris N.B.W., Tindle A.G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks // *Journal of Petrology*. 1984. V. 25. P. 956–983.

[4] Whittington A.G., Hofmeister A.M., Nabelek P.I. Temperature-dependent thermal diffusivity of the Earth's crust and implications for magmatism // Nature. 2009. V. 458. P. 319–321.

Взаимодействие базитового и карбонатного расплавов в коллизионной системе Западного Прибайкалья

Е.В. Скляр¹, А.В. Лавренчук²

¹ *Институт земной коры СО РАН, Иркутск*

² *Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск*

Спектр пород Тажеранского массива представляет собой квинтэссенцию процессов мантийно-корового взаимодействия в пределах раннепалеозойской Ольхонской коллизионной системы. В его строении участвуют толеитовые и субщелочные габброиды, сиениты, нефелиновые сиениты возрастного интервала 470–457 млн лет, а также карбонатные породы, обнаруживающие признаки интрузивного внедрения [1, 2].

В центральной части массива присутствует субширотная полоса, сложенная доломитсодержащими кальцитовыми мраморами в ассоциации с пироксенитами и нефелин-пироксеновыми породами. Мраморы в приконтактной с пироксенитами зоне насыщены разноразмерными (от 5 см до 20 м) фрагментами пироксенитов, для которых характерен богатый глиноземом фассаит, для которого С. Молло с соавторами [3] на основании экспериментальных данных обосновали механизм кристаллизации из контаминированного карбонатным материалом базитового расплава.

Для Тажеранского массива предлагается следующая модель образования.

В результате внедрения мантийных базитовых выплавов в нижние части коры происходило частичное плавление гетерогенного силикатно-карбонатного субстрата, обеспечивающее появление расплавов карбонатного и силикатно-карбонатного состава. Взаимодействие карбонатного и мафического расплава приводило к появлению контаминированного «пироксенитового» расплава. Процессы сдвигового тектогенеза способствовали появлению локальных проницаемых зон (по механизму образования пулл-апарт структур) и совместному «порционному» внедрению на верхние уровни магм разного состава. Близко одновременные инъекции порций базитового, пироксенитового и карбонатного расплава приводили к смешению силикатного и карбонатного расплавов и кристаллизации пироксенитов с пироксенами фассаитового состава. Вследствие различия в температуре кристаллизации мафического и водонасыщенного карбонатного расплавов контактирующий с закристаллизованными пироксенитами карбонатный расплав по мере продвижения на более высокий уровень насыщался обломками пироксенитов. Дальнейшее остывание всей магматической системы при продолжающейся циркуляции флюидов обусловило процессы метасоматического преобразования пироксенитов с проявлением типичных скарновых ассоциаций.

[1] Скляр Е.В., Федоровский В.С., Котов А.Б., Лавренчук А.В., Мазукабзов А.М., Левицкий В.И., Сальникова Е.Б., Старикова А.Е., Яковлева С.З., Анисимова И.В., Федосеенко А.М. Карбонатиты в коллизионных обстановках и квазикарбонатиты Ольхонской коллизионной системы // Геология и геофизика. 2009. Т. 50, № 12. С. 1405–1423.

[2] Скляр Е.В., Федоровский В.С., Котов А.Б., Лавренчук А.В., Мазукабзов А.М., Старикова А.Е. Инъекционные карбонатные и силикатно-карбонатные комплексы в коллизионных системах (на примере Западного Прибайкалья, Россия) // Геотектоника. 2013. Т. 47, № 3. С. 58–77.

[3] Mollo S., Gaeta M., Freda C., Di Rocco T., Misiti V., Scarlato P. Carbonate assimilation in magmas: A reappraisal based on experimental petrology // Lithos. 2010. V. 114. P. 503–514.

Время закрытия центральной части Монголо-Охотского океана

*А.В. Аржанникова¹, Е.И. Демонтерова¹, М. Жоливе², Е.А. Михеева¹, А.В. Иванов¹,
С.Г. Аржанников¹, В.Б. Хубанов³, В.С. Каменецкий^{1,4}*

¹ *Институт земной коры СО РАН, Иркутск*

² *Университет Ренн, Ренн, Франция*

³ *Геологический институт СО РАН, Улан-Удэ*

⁴ *Университет Тасмании, Хобарт, Австралия*

Позднепалеозойско-раннемезозойский Монголо-Охотский океан простирался между Сибирским и Амурско-Северо-Китайским континентами. Время и условия закрытия океана широко обсуждаются в литературе. Вслед за классической работой Л.П. Зоненшайна с соавторами [1] считается, что океан закрывался как ножницы с юго-запада на северо-восток (в современных координатах), хотя время этого процесса в разных публикациях оценивается по-разному. Однако исследования последних лет показали, что западная (Западное Забайкалье) и восточная (Джагда) части океана закрылись практически одновременно на границе ранней и средней юры [2, 3].

В этой работе приводятся данные U-Pb (LA-ICP-MS) датирования обломочного циркона из хорошо охарактеризованных стратиграфических разрезов центральной части Монголо-Охотской шовной зоны [4]. К ним относятся начальные морские и завершающие континентальные толщи Восточно-Забайкальского бассейна, расположенные на севере Аргун-Идемегского террейна. Новые изотопно-геохронологические и стратиграфические данные для морских и континентальных отложений позволяют пересмотреть время накопления рассматриваемых осадочных толщ. В частности, оказалось, что ~ 165–155 млн лет назад в результате коллизии сформировался прогиб северной части Аргун-Идемегского террейна, приведший к развитию периферийного форландского бассейна. Таким образом, коллизионные процессы в центральной части Монголо-Охотского океана зоны произошли на 5–10 млн лет позже, чем в его западной и восточной части. Аргун-Идемегский террейн был последним блоком, который столкнулся с Сибирским континентом, что ставит под сомнение модель закрытия Монголо-Охотского океана в виде ножниц. По-видимому, в зависимости от первоначальной формы палеоконтинентальных окраин различные сегменты океана закрывались независимо друг от друга.

[1] Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Натапов Л.М. Геология СССР. Книга 1. М.: Наука, 1990. 327 с.

[2] Demonterova E.I., Ivanov A.V., Mikheeva E.A., Arzhannikova A.V., Frolov A.O., Arzhannikov S.G., Bryanskiy N.V., Pavlova L.A. Early to Middle Jurassic history of the southern Siberian continent (Transbaikalia) recorded in sediments of the Siberian Craton: Sm-Nd and U-Pb provenance study // Bulletin de la Societe Géologique de France. 2017. V. 188. 8.

[3] Sorokin A.A., Zaika V.A., Kovach V.P., Kotov A.B., Xu W., Yang H. Timing of closure of the eastern Mongol – Okhotsk Ocean: constraints from U – Pb and Hf isotopic data of detrital zircons from metasediments along the Dzhangdy Transect // Gondwana Research. 2020. V. 81. P. 58–78.

[4] Arzhannikova A.V., Demonterova E.I., Jolivet M., Mikheeva E.A., Ivanov A.V., Arzhannikov S.G., Khubanov V.B., Kamenetsky V.S. Segmental closure of the Mongol-Okhotsk Ocean: Insight from detrital geochronology in the East Transbaikalia Basin // Geoscience Frontiers. 2022. V. 13. 101254.

Научное издание

Орогенез: образование и рост континентов и
суперконтинентов

Материалы рабочего совещания

(15–17 октября 2021 г., пос. Листвянка)

Ответственный редактор
к.г.-м.н. *С.А. Писаревский*

Литературный редактор
Е.А. Балукова

Институт земной коры СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128

Подписано в печать 12.10.2021 г. Формат 60×90/8.
Гарнитура Times New Roman. Бумага Ballet. Печать офсетная.
Уч.-изд. л. 1.7. Тираж 50 экз. Заказ __191__.

Отпечатано в Институте земной коры СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128