УДК 550.93+550.4:553.32

Комплексная методика изотопных исследований Хойто-Агинского марганценосного узла

А. Н. Соловьев[a], Т. В. Чекушина[b], Л. М. Соловьева[a]
[a] Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы
117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6. E-mail: L.MSoloveva@yandex.ru
[b] Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова Российской академии наук
111020, Москва, Крюковский туп., д. 4. E-mail: council-ras@bk.ru
(статья поступила в редакцию 21.01.2026 г.)

Цель статьи заключается в том, чтобы подробно изложить комплексную методику изотопных исследований марганцевой минерализации Хойто-Агинского узла для определения геодинамических условий ее формирования и описания ее генетической модели. Описанная методика включает в себя актуальные методы исследования. Рассмотрено применение U-Pb-датирования псиломелана и пиролюзита для оценки возраста марганцевых руд. Результативность данного метода была доказана на примере иного исследования, где в качестве геохронометра был взят гаусманит – другой оксид марганца. Понимая, что данный метод требует дальнейшего изучения, авторы статьи предлагают совместное исследование с использованием Re-Os-систематики нижележащих марганцевых карбонатных отложений, имеющих осадочно-диагенетическую природу. Изучение Re-Os-датировок расширит сведения о геодинамических обстановках палеобассейна, кроме этого, послужит надежным ориентиром для оценки U-Pb-датирования псиломелана и пиролюзита.
Ключевые слова: *Re-Os-систематика, U-Pb-анализ оксидов марганца, Восточное Забайкалье, Монголо-Охотский орогенный пояс, датирование карбонатов марганца*.
DOI: 10.17072/psu.geol.25.3.291

Введение

Мировая практика изотопных исследований насчитывает огромнейшее число работ. По данным исследованиям собраны отечественные (Вотяков, 2024) и иностранные базы данных, отражающие динамику развития изотопных датирований (Puetz et al., 2021). В последнее время особенно актуальными стали реконструкции геодинамических условий осадконакопления. Древние палеобассейны зачастую изучаются методом U-Pb изотопного датирования LA-ICP-MS путем выделения из толщ обломочных цирконов (Чистякова и др., 2023; Гракова и др., 2025). Из числа акцессорных минералов чаще всего для исследования выбирается именно циркон (Kosler et al., 2003). Это объясняется прежде всего тем, что циркон наиболее изучен. Выделенные эталонные образцы циркона, например стандарт Temora, служат опорой для определения возраста в SIMS-приемах датирования (Ронкин и др., 2020), облегчают процессы проведения и интерпретации данных исследования. Большие базы по U-Pb-датированию детритового циркона подкрепляют надежность и точность каждого нового исследования. В этом плане у циркона на данный момент нет равных.

Однако у обломочного циркона есть существенные недостатки. При использовании циркона в качестве геохронометра мы можем столкнуться с фундаментальными погрешностями. Существует весьма ограниченный диапазон магматических расплавов (Spencer et al., 2016), где циркон кристаллизуется. Это сказывается на общей картине результатов исследования: мы имеем избыточные или недостаточные данные, соответствующие определенным возрастным диапазонам. Распределение возраста обломочных цирконов может не показывать истинный вклад исходных пород в состав толщ.

© Соловьев А. Н, Чекушина Т. В., Соловьева Л. М., 2026

Работа лицензирована в соответствии с CC BY 4.0. Чтобы просмотреть копию этой лицензии, посетите https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Помимо этого, цирконы очень устойчивы к внешним воздействиям. Зачастую изотопное датирование цирконов показывает изначальный возраст их кристаллизации, не дав исследователю информации относительно процессов переотложения, литификации, метаморфизма (Бадида и др., 2020; Вотяков, 2024).

Ряд исследователей предлагают дополнять U-Pb-датирование детритовых цирконов совместным U-Pb-анализом апатитов (Берзин и др., 2024; Finzel et al., 2025). Так обеспечивается комплексность подхода: недостатки U-Pb-изотопии циркона компенсируются датированием из апатита. Апатит встречается в большем числе магматических пород. Он не оказывает такого большого сопротивления процессам химического и физического выветривания, поэтому апатит больше, чем циркон, способен дать информацию о процессах, нарушающих замкнутость изотопной системы (Бадида и др., 2020).

Как видно, разные исследователи хотят обеспечить комплексность методики своей работы (Пыстин и др., 2019; Никулова и др., 2023). Происходит поиск новых решений в U-Pb-изотопии минералов (Schmitz et al., 2013). Так, исследователи (Li et al., 2025) нашли новый, еще не получивший большого распространения метод, а именно U-Pb-анализ гаусманита. Использование минерала оксида марганца в изотопном анализе решает проблему поиска подходящего геохронометра для марганцевых руд. Изучение вмещающих отложений путем изотопных исследований акцессориев может не дать полной достоверной информации о генезисе месторождения или рудопроявления. Метод U-Pb-датирования оксидов марганца in situ позволяет избежать неопределенности во время интерпретации данных.

Стоит отметить, что марганец и ассоциирующиеся с ним соединения выступают индикаторами геодинамических обстановок осадконакопления (Liu et al., 2025; Ma et al., 2025). При датировании оксидов марганца мы получаем возможность не только точно определять возраст формирования марганцевых руд, но и изучать геохимические процессы древних палеобассейнов.

В данной статье авторы предлагают комплексную методику изотопных исследований марганцевой минерализации с целью определения ее генетической модели, а также установления геодинамических условий ее формирования. Предлагаемое авторами исследование будет рассматриваться на примере Хойто-Агинского марганценосного узла Восточного Забайкалья. Предполагается, что исследование окажется полезным не только для определения генезиса минерализации, но и для изучения эволюции Монголо-Охотского складчатого пояса (МОСП). В перспективе новые данные о палеогеографии региона должны расширить современные представления о формировании МОСП.

Исходные данные

На территории Восточного Забайкалья расположен Хойто-Агинский рудный узел (Куриленко и др., 2024), чья марганцевая минерализация принадлежит агинской и зуткулейской свитам акша-илинской серии верхней перми-нижнего триаса (Кириллова, 2020; Куриленко и др., 2002). Хойто-Агинское марганценосное поле выделяется как менее крупная структура внутри рудного узла.

Хойто-Агинское рудное поле плотно изучалось в 1994–1998, 1998–2002 гг. (Куриленко и др., 2024). В связи с последними исследованиями 2014–2016 гг. впервые стал выделяться Хойто-Агинский рудный узел, увеличилось количество отмеченных, но плохо изученных многочисленных пунктов минерализации. Хойто-Агинское рудное поле включает в себя среднее по запасам месторождение Монголтуйское, малое месторождение Кусочи, 4 рудных проявления и множество пунктов минерализации. Запасы месторождений Кусочи и Монголтуйское на балансе не состоят. В результате исследований 1998–2002 гг. были оценены перспективы марганцевых руд этих месторождений. В связи с низким качеством руды, сложностью строения рудных залежей они не разрабатывались (Куриленко и др., 2024).

Однако актуальны исследования именно пунктов минерализации, поскольку в них предполагаются промышленные залежи марганца. Помимо этого, мы имеем дело с мине-

рализацией, которая происходила на фоне крупных тектонических событий, в частности закрытия Монголо-Охотского океана, его западного фрагмента (Парфенов и др., 1999; Смирнова, 2022). Изучение марганца и его оксидов может напрямую указать на палеоисторию региона.

Можно предположить полигенный генезис минерализации (Куриленко и др., 2024), поскольку она представлена первичными рудами и настилающими их окисленными. Были выявлены первичные силикатно-карбонатные руды, представленные манганосидеритом и браунитом. Данные рудные отложения относят к марганцево-рудной гидротермальной формации. Первичная марганцевая минерализация приурочена к трещиноватым, проницаемым алевролитам и микросланцам, которые затронуты аргиллизитовыми изменениями. Рудные залежи развиты в зоне дробления.

Окисленные руды сложены псиломелан-пиролюзитовыми образованиями. В верхних частях руд псиломелан преобладает над остальными рудными минералами. Ресурсная пиролюзит-кварцевая минеральная ассоциация развивается до глубин 36–38 м, она наложена на первичные руды.

Для первичных и окисленных типов рудных отложений можно выделить вмещающие породы в виде окремненных алевролитов, кремнистых сланцев и алевролитов нижнезуткулейской подсвиты акша-илинской серии.

Помимо описанных пород, под первичными рудами залегают отложения родохрозита, генетически связанные с зеленосланцевым типом регионального метаморфизма. Вмещающими породами являются микросланцы низкой ступени метаморфизма (Куриленко и др., 2024). Ранее высказывались предположения о ремобилизации и переотложении родохрозита в течение метаморфизма. По характеру вмещающих отложений можно предположить, что отложения родохрозита сингенетичны метаморфизму.

Считается, что манганосидерит-браунитовые руды отлагались в неспокойных гидродинамических условиях континентального склона палеобассейна. Вызывает вопросы глубина палеобассейна: на основе имеющихся противоречивых данных она неясна (Куриленко и др., 2024). Вместе с тем происходил привнос терригенного материала с суши. Окисленные руды могли быть сформированы в результате низкоамплитудных вертикальных движений, когда происходила инверсия Среднеононского прогиба – крупной тектонической структуры, сложенной акша-илинской серией. В своих границах Среднеононский террейн, выделяемый на территории западного фрагмента МОСП, полностью повторяет акша-илинскую серию (Куриленко и др., 2024). Можно предположить участие гидротермальных растворов в формировании окисленных месторождений. Ввиду того, что движения при закрытии палеобассейна были недостаточно интенсивными, мы имеем дело с исследованной рудой скудного качества.

Однако, как и другие исследователи данной минерализации (Куриленко и др., 2024), авторы предполагают, что первичные руды имеют осадочно-диагенетическое происхождение. Окисленные руды, в свою очередь, вероятно, были мобилизованы и переотложены в результате гидротермально-инфильтрационных процессов.

Авторами была разработана комплексная методика исследований, направленных на изучение марганцевой минерализации Хойто-Агинского поля. Ее целью является получение наиболее точных и достоверных сведений о генезисе руд и рудовмещающих формаций. Методика стремится описать как можно больше свойств данной минерализации. При разработке методики были проанализированы и переработаны доступные источники информации.

Материалы и методы

Для начала стоит обозначить, что исследование первичных, окисленных руд и родохрозитовых отложений предполагается различным. Ремобилизованными и переотложенными породами будем считать окисленные руды и отложения родохрозита.

Существенный смысл заключается в работе с окисленными рудами, ведь они более распространены, чем отложения родохрозита, помимо этого, именно эти руды представляют экономическую ценность (Куриленко и др., 2024). И все это с учетом потен-

циальных сложностей, с которыми мы можем столкнуться при изотопном датировании родохрозита и вмещающих его пород.

Гипотеза, на которую опирается множество исследователей (Liu G. et al., 2025; Madondo et al., 2025), говорит об отложении марганца в условиях значительной роли органического вещества. Поскольку породы, содержащие органическое вещество, достаточно успешно датируются Re-Os-системой (Mandal et al., 2021), мы можем говорить о возможном изотопном Re-Os-исследовании минерала родохрозита. Однако в данном случае вмещающими толщами являются породы зеленосланцевой формации, и предполагается, что родохрозит сингенетичен метаморфизму.

Допустим, мы применяем Re-Os-датирование относительно родохрозита. Что мы рассчитываем получить: возраст первичного отложения или уже переотложения в условиях метаморфизма. Надежность датировок Re-Os при метаморфизме обеспечивается вплоть до фации зеленых сланцев (Goswami et al., 2024; Yang et al., 2009). При таких обстоятельствах авторы не видят смысла проводить Re-Os-исследование вмещающих толщ. Добавим, что широко распространена рекомендация в метаморфизированных отложениях отбирать пробы, которые наименее подверглись изменению. Датирование и исследование Re-Os-системой самого родохрозита вызывает вопросы.

Однако польза Re-Os-исследований, помимо возрастных датировок, неоспорима: возможность получить данные об окислительно-восстановительных условиях среды формирования пород (Kunert et al., 2023; Madondo et al., 2025). Вместе с Re-Os для этих же целей изучается изотопия углерода, кислорода, серы (Liu Z., 2025).

Имеет смысл использовать Re-Os-систему относительно первичных руд, представленных манганосидерит-браунитом. Существует практика датирования Re-Os на карбонате марганца (Liu G. et al., 2025), ее мы будем придерживаться, поэтому Re-Os-исследование будет направлено исключительно на изучение манганосидерита. Если посмотреть на строение рудных залежей, то видно, что над манганосидерит-браунитовыми отложениями расположены псиломелан-пиролюзитовые руды. Предположительно, окисление и переотложение руд произошло в момент инверсии прогиба, так авторы объясняют генезис псиломелан-пиролюзитовой минерализации. Сами манганосидеритовые и браунитовые отложения не подверглись окислению. Это дает нам возможность предполагать существование морского бассейна во время отложения первичных руд. Поскольку минерализация территориально расположена в Восточном Забайкалье, мы можем предполагать Монголо-Охотский океан (Парфенов и др., 1999; Dou et al., 2022).

Условия, в которых откладывалась минерализация, позволяют применить Re-Os-датирование манганосидерита. Стоит уточнить, что помимо возраста минерализации Re-Os-геохронометр позволяет получить Os-изотопный состав морской воды в период формирования руды (Liu G. et al., 2025; Rooney et al., 2025). Кроме того, $^{187}Os/^{188}Os$ в морской воде используется в качестве косвенного показателя чувствительности континентального выветривания к тектоническим и/или климатическим переменам. Исходя из этого, Re-Os-датирование в перспективе сделает внушительный вклад в изучение палеогеографии региона и, в частности, построения генетической модели марганцевой минерализации Хойто-Агинского узла.

Использование изотопных датировок для богатых органическими остатками и палинологическими комплексами агинской и зуткулейской свит весьма спорно. Нет возможности датировать осадочные отложения максимально точно, как это возможно относительно магматических комплексов. Однако самым актуальным на сегодняшний день методом для данных условий является исследование LA-ICP-MS U-Pb-системы для определения палеогеографических обстановок и получения представления о реконструкции осадконакопления (Daniel, 2019). Данный метод не предполагает получения точных датировок, мы можем получить приблизительные сведения о внутрибассейновой корреляции разрезов.

Для большей точности этот метод сопровождается изучением РЗЭ в обломочных цирконах, датировками Lu-Hf (Бадида и др., 2020). Некоторые исследователи предлагают использовать комплексную методику, включающую рамановскую спектрометрию (Чи-

стякова и др., 2023). Помимо этого, распространены датировки U-Pb LA-ICP-MS циркона и апатита, поскольку сочетание датировок и по циркону, и по апатиту позволяет отчетливее видеть процессы первоначального отложения и дальнейшие изменения, в том числе метаморфические (Бадида и др., 2020; Finzel et al., 2025).

Авторы решили отказаться от применения датировки U-Pb LA-ICP-MS обломочных цирконов, поскольку на данный момент считают это нецелесообразным. Возраст осадочных толщ, представленных ритмопачками агинской и зуткулейской свит, определен биостратиграфическими методами (Куриленко и др., 2024). Несмотря на то, что биостратиграфические методы считаются относительными, и поэтому их точность может подвергаться сомнению, многочисленные результаты изучения обильных остатков флоры и палинологических комплексов вызывают доверие. Это напрямую связано с обилием ископаемой флоры и схожими полученными датировками.

Второй момент, связанный с пользой отказа от исследования U-Pb LA-ICP-MS, это значительный объем работ и их стоимость.

В числе изотопных исследований, направленных на определение генетической модели Хойто-Агинского рудного поля, метод U-Pb LA-ICP-MS для терригенных вмещающих толщ не должен быть первостепенным. Его необходимость может быть обусловлена результатами уже проведенных геохимических и изотопных исследований, в том числе и тех, которые авторы предлагают в данной статье.

Исходя из всего вышесказанного, возраст вмещающих толщ будем считать в соответствии с госгеолкартами (Куриленко и др., 2024), тем более последние палинологические исследования дали новые сведения и во многом подтвердили уже существующие.

Датирование оксида марганца

Псиломелан-пиролюзитовые отложения, венчающие марганценосные коры выветривания, заслуживают особого внимания. Именно в них сосредоточены руды, которые могут вызывать интерес с экономической точки зрения. Предполагается, что ценность могут составлять многочисленные пункты минерализации, которые на данный момент не были исследованы должным образом.

Для окисленных отложений авторы предлагают использовать совместное U-Pb-датирование псиломелана и пиролюзита. Есть успешные датирования гаусманита, подтверждающие его роль точного геохронометра (Li et al., 2025). Минералы оксидов марганца могут в значительной степени содержать U и в более низкой степени – Pb, что обеспечивает высокий потенциал такого геохронологического инструмента. Исследователи (Li et al., 2025) приводят методику, которую возможно осуществить в условиях большинства лабораторий, описана подготовка образцов к геохронологическим исследованиям in situ U-Pb с привлечением линейно-растровой абляции LA-ICP-MS.

Стоит отметить, что датирование оксидов и гидроокислов марганца требует дальнейшего изучения. В исследовании, посвященном первому датированию гаусманита, полученный результат сопоставлялся с уже имеющимися возрастными датировками, в частности с возрастом вмещающих прослоек базальтов.

Результаты

В нашем случае нет результатов проведенных изотопных исследований, на которые можно было опереться в объяснении нижней возрастной границы рудообразования. Данные биостратиграфии обеспечивают возраст вмещающих толщ. Предлагаемое авторами Re-Os-датирование нижележащих манганосидеритовых отложений должно предоставить данные о возрасте карбонатной марганцевой минерализации. Датирование Re-Os-системы вызывает больше доверия, чем U-Pb-анализ оксидов марганца. Это напрямую связано со степенью изученности данных методов (Li et al., 2025; Liu G. et al., 2025; Liu Z. et al., 2025).

Подтверждением результативности U-Pb-исследования оксидов марганца может служить получение определенных датировок, аналогичных Re-Os-результатам и соответствующих возрастному интервалу вмещающих толщ: нижний триас зуткулейской свиты. Учитывая наложенный тип оруденения

(Куриленко и др., 2024), речь может идти и о более позднем возрасте минерализации. Результаты метода U-Pb-анализа оксидов марганца могут считаться недействительными, если датированный возраст младше Re-Os-датировок.

Выводы

На данный момент метод геохронологических датирований U-Pb с линейно-растровой абляцией LA-ICP-MS развивается очень активно (Daniel et al., 2019; Li et al., 2024; Liu P. et al., 2024), соответственно, возможности этого метода расширились: стало реальным использование различных минералов как точных геохронометров.

Датирование минералов, слагающих руды, дает возможность изучать возраст минерализации, а не вмещающих толщ (Li et al., 2025). Мы можем отойти от представления сингенетического типа оруденения, поскольку возможно получить точный возраст рудообразования. Использование U-Pb-датирований оксидов марганца позволяет получить в результате не только данные о возрасте рудных отложений, но и актуальные сведения для описания генетической модели месторождения. Исследование возраста отложений оксида марганца имеет в качестве результата ценную информацию о химическом составе морской воды и окислительно-восстановительных условиях среды (Ma et al., 2025; Liu G et al., 2025).

Представленная авторами комплексная методика Хойто-Агинского марганценосного узла дает возможность широко описать генетическую модель рудообразования. Предложено дополнительно исследование Re-Os-датирования нижележащих манганосидеритовых отложений для получения сведений о палеогеографии региона. Считается, что Re-Os-датировки послужат ориентиром для оценки результативности U-Pb-датирования псиломелана и пиролюзита.

Учитывая позитивный опыт датирования гаусманита, предрасположенность оксидов марганца выполнять геохронологическую функцию, в перспективе предполагается получить достоверные датировки для окисленных руд путем применения U-Pb-анализа псиломелана и пиролюзита.

Библиографический список

Бадида Л. В., Маслов А. В., Мизенс Г. А. Реконструкция состава пород питающих провинций. Статья 4. Современные методы исследования тяжелых обломочных минералов (цирконов апатитов) // Литосфера. 2020. Т. 20(3). С. 363–385. DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-3-363-385 EDN: ZYKCMJ

Берзин С. В., Петров С. В., Конопелько Д. Л., Курапов М. Ю., Головина Т. А., Черненко Н. Я., Червяковский В. С. Использование состава циркона и апатита при прогнозировании Cu-Mo-Au-порфирового оруденения в Пекинском и Тессемском массивах Таймыро-Североземельской складчатой области // Литосфера. 2024. Т. 24(3). С. 547–565. DOI: 10.24930/2500-302X-2024-24-3-547-565 EDN: VJXRLS

Вотяков С. Л. Актуальные проблемы в области строения, свойств и методов исследования минералов // Литосфера. 2024. Т. 24(2). С. 203–213. DOI: 10.24930/1681-9004-2024-24-2-203-213 EDN: CJTBAZ

Гракова О. В., Пыстин А. М., Кушманова Е. В., Хубанов В. Б. Первые результаты U-Pb-датирования детритового циркона из терригенных пород обеизской свиты Приполярного Урала: изотопный возраст и возможные источники сноса // Литосфера. 2025. Т. 25(3). С. 506–520. DOI: 10.24930/2500-302X-2025-25-3-506-520 EDN: EMXUMM

Кириллова Г. Л. Триасовый этап в эволюции мезозойского седиментогенеза Монголо-Охотской складчатой системы // Тихоокеанская геология. 2020. Т. 39(2). С. 3–20. DOI: 10.30911/0207-4028-2020-39-2-3-20 EDN: HHYCQN

Куриленко А. В., Карасев В. В., Ядрищенская Н. Г., Лиханов В. Д., Соломонов П. Г., Баранов И. Г. Государственная геологическая карта Российской Федерации м-ба 1:200 000. Изд. 2-е. Сер. Даурская. Лист M-50-VII (Агинское). Объяснит. записка / Минприроды России, Роснедра, ФГБУ «ВСЕГЕИ», АО «Сибирское ПГО», ОСП «Читагеологоразведка». М.: Московский филиал ФГБУ «Институт Карпинского», 2024. 170 с.

Куриленко А. В., Котляр Г. В., Кульков Н. П. [и др.] Атлас фауны и флоры палеозоя – мезозоя Забайкалья. Российская академия наук, Сибирское отделение, Читинский институт природных ресурсов, Министерство природных ресурсов, Федеральное государственное унитарное геологическое предприятие «Читагеолсъемка». Новосибирск: Наука, 2002. 713 с. ISBN: 5-02-031930-9 EDN: XAWJAP

Никулова Н. Ю., Гракова О. В., Хубанов В. Б. Морфология, строение и состав циркона из

метапесчаников алькесвожской толщи (Приполярный Урал) // Вестник Пермского университета. Геология. 2023. Т. 22, № 2. С. 99–106. DOI: 10.17072/psu.geol.22.2.99 EDN: UGWCPE

Парфенов Л. М., Попеко Л. И., Томуртогоо О. Проблемы тектоники Монголо-Охотского орогенного пояса // Тихоокеанская геология. 1999. Т. 18, № 5. С. 24–43. EDN: XSSGTB

Пыстин А. М., Кушманова Е. В., Пыстина Ю. И. [и др.] Возраст протолитов и геохронология метаморфизма Неркаюского эклогит-сланцевого комплекса Приполярного Урала // Вестник Пермского университета. Геология. 2019. Т. 18, № 2. С. 96–107. DOI: 10.17072/psu.geol.18.2.96 EDN: ZYWJXN

Ронкин Ю. Л., Маслов А. В., Синдерн С. U-Pb (ID-TIMS) геохронологический метод и SIMS-приемы датирования циркона «in situ»: возможности и ограничения // Литосфера. 2020. Т. 20, № 3. С. 411–431. DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-3-411-431 EDN: JSILPG

Смирнова Ю. Н. Возраст и геодинамическая обстановка формирования нижнеюрских песчаников Ононского фрагмента Агинского террейна, Монголо-Охотский складчатый пояс // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2022. Т. 30, № 3. С. 25–40. DOI: 10.31857/S0869592X2203005X EDN: EFMKSY

Чистякова А. В., Веселовский Р. В., Хубанов В. Б., Иванов А. В., Марфин А. Е., Брянский Н. В., Голубев В. К. Реконструкция питающих провинций московского бассейна в пермско-триасовое время по данным U-Pb LA-ICP-MS-датирования и рамановской спектроскопии обломочного циркона // Геодинамика и тектонофизика. 2023. Т. 14(5):0718. DOI: 10.5800/GT-2023-14-5-0718 EDN: PHCWPG

Dou S., Li S. C., Zhao Z. R. et al. Late Triassic Sedimentary Record of Southward Subduction of Mongol-Okhotsk Ocean Plate: Constraints for Tectonic Background and Provenance // Acta Petrologica Sinica. 2022. Vol. 38(10). P. 3191–3208. DOI: 10.18654/1000-0569/2022.10.17 EDN: VMBUDW

Finzel E. S., Thomson S. N., Pearson D. M., Horkley L. K., Garber K., Gardner C. First cycle or polycyclic? Combining apatite and zircon detrital U-Pb geochronology and geochemistry to assess sediment recycling and effects of weathering // Earth and Planetary Science Letters. 2025. Vol. 650. P. 119131. DOI: 10.1016/j.epsl.2024.119131 EDN: CLJBBT

Goswami V., Hannah J. L., Stein H. J., Ahlberg P., Maletz J., Lundberg Fr., Ebbestad J. O. R. Re-Os geochronology and geochemical evolution of late Cambrian to Middle Ordovician Alum and Tøyen shales, Sweden // Global and Planetary Change. 2024. Vol. 242. P. 104580. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2024.104580 EDN: PLYIOD

Kosler J., Sylvester P. J. Present trends and the future of zircon in geochronology: laser ablation ICP/MS // Zircon. Rev. Miner. 2003. Vol. 53. P. 244–275.

Kunert A., Kendall B. Global Ocean redox changes before and during the Toarcian Oceanic Anoxic Event // Nat. Commun. 2023. Vol. 14. P. 815. DOI: 10.1038/s41467-023-36516-x EDN: GEGTTM

Li B., Zhang W. D., Zhao J. X., Liu P., Feng J. P., Feng Y. X., Xiao Y. U-Pb geochronology of carbonate-hosted Pb-Zn ores reveals plate-tectonic evolution of eastern Asia during the early Paleozoic // Sci Rep. 2024 Vol. 14(1). P. 25313. DOI: 10.1038/s41598-024-76170-x EDN: GDORGH

Li W.-T., Jiang S.-Y., Su H.-M., Huang Q., Pi D.-H., Wang W., Xiao S. Dating a sedimentary manganese ore deposit using U-Pb geochronology of hausmannite (Mn3O4) by LA-ICP-MS: An example from Heqing Mn deposit, Yunnan Province, Southwestern China // Ore Geology Reviews. 2025. Vol. 183. P. 106711. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2025.106711 EDN: OJRJRI

Liu G., Fu Y., Chen D. Z., Guo C., Tian F., Li C., Wei S. C., Jiang R., Yan S., Chen D., Chen. R. Direct Re-Os dating of manganese carbonate ores in Zunyi, Guizhou and implication for their genesis // Ore Geology Reviews. 2025. Vol. 180. P. 106565. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2025.106565 EDN: ISKAVB

Liu P., Ding X., Liu Y. et al. Late Mesoproterozoic to Early Neoproterozoic Tectonic Evolution of the SW Yangtze Block, South China: Evidence from U-Pb Geochronology and Lu-Hf Isotopes of Detrital Zircons from Sedimentary Rocks // J. Earth Sci. 2024. Vol. 35. P. 812–827. DOI: 10.1007/s12583-021-1563-3 EDN: GIGQAV

Liu Z., Liu Y., Zhang S., Xiao L., Long J., Chen D., Wang Y., Wei Z., Zheng Y., Xiao L. A new exhalative sedimentary metallogenetic model for Permian manganese deposits in China // Journal of Asian Earth Sciences. 2025. Vol. 292. P. 106740. DOI: 10.1016/j.jseaes.2025.106740 EDN: TGVDTC

Ma Z., Ling Y., Qin Y., Liu Y., Yao X., Wang P., Liu X. Paleo-ocean chemistry characteristics of the Cryogenian Datangpo Formation in South China and implications for manganese metallogenesis // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 2025. Vol. 677. P. 113212. DOI: 10.1016/j.palaeo.2025.113212 EDN: DVNDKJ

Madondo J., Gyollai I., Fintor K., Szabó M., Bérczi S., Partida E. G., Canet C., Chacon E., Mishra S., Polgári M. Microbial mediation on the development of the Molango manganese ore Deposits,

Mexico // Ore Geology Reviews. 2025. Vol. 185. P. 106782. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2025.106782 EDN: SZYMMM

Mandal A., Tripathy G. R., Goswami V., Ackerman L., Parcha S. K., Chandra R. Re-Os and Sr isotopic study of Permian-triassic sedimentary rocks from the Himalaya: shale chronology and carbonate diagenesis // Minerals 2025. Vol. 11. DOI: 10.3390/min11040417 EDN: LJTMSY

Puetz S. J., Spencer C. J., Ganade C. E. Analyses from a validated global U-Pb detrital zircon database: Enhanced methods for filtering discordant U-Pb zircon analyses and optimizing crystallization age estimates // Earth-Sci. Rev. 2021. Vol. 220. P. 103745. DOI: 10.1016/j.earscirev.2021.103745 EDN: LPJJTC

Rooney A. D., Hnatyshin D., Toma J., Saintilan N. J., Millikin A. E. G., Selby D., Creaser R. A. Application of the ^{187}Re-^{187}Os geochronometer to crustal materials: Systematics, methodology, data reporting, and interpretation // GSA Bulletin. 2024. Vol. 136(9–10). P. 4091–4129. DOI: 10.1130/B37294.1 EDN: DEAUAM

Schmitz M. D., Kuiper K. F. High-precision geochronology // Elements. 2013. Vol. 9(1). P. 25–30.

Wu Y., Fang X., Ji J. A global zircon U–Th–Pb geochronological database // Earth Syst. Sci. Data. 2023. Vol. 15. P. 5171–5181. DOI: 10.5194/essd-15-5171-2023 EDN: HBIERL

Yang G., Hannah J. L., Zimmerman A., Stein H. J., Bekker A. Re-Os depositional age for Archean carbonaceous slates from the southwestern Superior Province: Challenges and insights // Earth and Planetary Science Letters. 2009. Vol. 280(1–4). P. 83–92. DOI: 10.1016/j.epsl.2009.01.019 EDN: MMJHLX

Yang G., Zimmerman A., Hurtig N. C., Georgiev S. V., Goswami V., Hannah J. L., Stein H. J. Chemical procedures for rhenium extraction from geological samples: optimising the anion resin bead clean-up step // Geostand. Geoanal. Res. 2020. DOI: 10.1111/ggr.12318n/a EDN: SPOTEJ

Complex Methodology of Isotope Studies for the Khoito-Aginskiy Manganese-Bearing Node

A. N. Solovyov[a], T. V. Chekushina[b], L. M. Solovyova[a]

[a] Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba University (RUDN) 6 Miklukho-Maklaya Str., Moscow 117198, Russia E-mail: L.MSoloveva@yandex.ru

[b] Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources (IPKON) of RAS 4 Kryukovskiy Dead End, Moscow 111020, Russia. E-mail: council-ras@bk.ru

The purpose of the article is to describe in detail a comprehensive methodology for isotope studies of the manganese mineralization of the Khoito-Aginskiy Node in order to determine the geodynamic conditions of its formation and describe its genetic model. The described methodology includes current research methods. The application of U-Pb dating of psilomelan and pyrolusite to estimate the age of manganese ores is considered. The effectiveness of this method was proved by the example of another study, where another manganese oxide a gausmanite was used as a geochronometer. Realizing that this method requires further study, the authors of the article propose a joint study using Re-Os systematics of the underlying manganese carbonate deposits having a sedimentary diagenetic nature. The study of Re-Os dating will expand information about the geodynamic conditions of the paleobasin. In addition, it will serve as a reliable reference point for assessing the U-Pb dating of psilomelan and pyrolusite.

Key words: *Re-Os systematics, U-Pb analysis of manganese oxides, Eastern Transbaikalia, Mongol-Okhotsk orogenic belt, dating of manganese carbonates*.

References

Badida L.V., Maslov A.V., Mizens G.A. 2020. Rekonstruktsiya sostava porod pitayushchikh provintsiy. Statya 4. Sovremennye metody issledovaniya tyazhelykh oblomochnykh mineralov (cirkonov apatitov) [Provenance reconstructions. Article 4. Modern methods for investigating detrital minerals (zircon, apatite)]. Lithosphere (Russia). 20(3):363-385. (in Russian.) DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-3-363-385

Berzin S.V., Konopelko D.L., Petrov S.V., Kurapov M.Yu., Golovina T.A., Chernenko N.Ya., Chervyakovskiy V.S. 2024. Ispolzovanie sostava tsirkona i apatita pri prognozirovanii Cu-Mo-Au-porfirovogo orudeneniya v Pekinskom i Tessemskom massivakh Taymyro-Severozemelskoy skladchatoy oblasti [Utilizing compositions of zircon and apatite for prospecting of Cu-Mo-Au-porphyry mineralization in the Pekinskiy and Tessemskiy granitoid massifs of the Taymyr-Severozemelskaya folded area]. Lithosphere (Russia), 24(3):547-565.

(in Russian) DOI: 10.24930/2500- 302X-2024-24-3-547-565

Chistyakova A.V., Veselovskiy R.V., Khubanov V.B., Ivanov A.V., Marfin A.E., Bryanskiy N.V., Golubev V.K. 2023. Rekonstruktsiya pitayushchikh provintsiy moskovskogo basseyna v permsko-triasovoe vremya po dannym U-Pb LA-ICP-MS datirovaniya i ramanovskoy spektroskopii oblomochnogo tsirkona [Provenance of the permian-triassic red beds from the eastern part of the Moscow basin, East European platform: U-Pb LA-ICP-MS and Raman spectroscopy detrital zircon data]. Geodynamics & Tectonophysics. 14(5):0718. (in Russian) DOI: 10.5800/GT-2023-14-5-0718

Dou S., Li S. C., Zhao Z. R. et al. 2022. Late Triassic Sedimentary Record of Southward Subduction of Mongol-Okhotsk Ocean Plate: Constraints for Tectonic Background and Provenance. Acta Petrologica Sinica. 38(10):3191–3208. DOI: 10.18654/1000-0569/2022.10.17.

Finzel E.S., Thomson S.N., Pearson D.M., Horkley L.K., Garber K., Gardner C. 2025. First cycle or polycyclic? Combining apatite and zircon detrital U-Pb geochronology and geochemistry to assess sediment recycling and effects of weathering. Earth and Planetary Science Letters. 650:119131, DOI: 10.1016/j.epsl.2024.119131

Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii m-ba 1:200 000. Izd. 2-e. Ser. Daurskaya. List M-50-VII (Aginskoe). Obyasnit. zapiska [The State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:200 000. Second edition. The Daurian series. Sheet M-50-VII. (Aginskoe): explanatory note]. *Ed.* E.I. Berzon. Moscow: Moscow branch of the FGBU Karpinskiy Institute, 2024, p. 170. (in Russian).

Goswami V., Hannah J.L., Stein H.J., Ahlberg P., Maletz J., Lundberg Fr., Ebbestad J.O.R. 2024. Re-Os geochronology and geochemical evolution of late Cambrian to Middle Ordovician Alum and Tøyen shales, Sweden. Global and Planetary Change. 242: 104580. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2024.104580.

Grakova O.V., Pystin A.M., Kushmanova E.V., Khubanov V.B. 2025 Pervye rezultaty U-Pb-datirovaniya detritovogo tsirkona iz terrigennykh porod obeizskoy svity Pripolyarnogo Urala: izotopnyy vozrast i vozmozhnye istochniki snosa [First results of U-Pb dating of detrital zircon from terrigenous rocks of the Obeiz Formation of the Subpolar Urals: isotope age and possible provenance sources]. Lithosphere (Russia). 25(3):506-520. (in Russian) DOI: 10.24930/2500-302X-2025-25-3-506-520.

Kirillova G.L. 2020. Triasovyy etap v evolyutsii mezozoyskogo sedimentogeneza Mongolo-Okhotskoy skladchatoy sistemy. Tikhookeanskaya geologiya [Triassic Stage in the Evolution of Mesozoic Sedimentogenesis of the Mongol–Okhotsk Fold Belt]. Russian Journal of Pacific Geology. 14(2):97-113. (in Russian) DOI: 10.1134/S18197 14020020025.

Kosler J., Sylvester P.J. 2003. Present trends and the future of zircon in geochronology: laser ablation ICP/MS. Zircon. Rev. Miner. 53:244-275. DOI: 10.2113/0530243

Kunert A., Kendall B. 2023. Global Ocean redox changes before and during the Toarcian Oceanic Anoxic Event. Nat. Commun. 14:815. DOI:10.1038/ s41467-023-36516-x.

Kurylenko A.V., Kotlyar G.V., Kulkov N.P., et al. 2002. Atlas fauny i flory paleozoya - mezozoya Zabaykalya [Atlas of the fauna and flora of the Paleozoic - Mesozoic of Transbaikal region]. SO RAS, Chita Institute of Natural Resources, Chitageolsyomka. Novosibirsk, Nauka, p. 713. (in Russian)

Li B., Zhang W.D., Zhao J.X., Liu P., Feng J.P., Feng Y.X., Xiao Y. 2024. U-Pb geochronology of carbonate-hosted Pb-Zn ores reveals plate-tectonic evolution of eastern Asia during the early Paleozoic. Sci. Rep. Oct. 25; 14(1):25313. DOI: 10.1038/s41598-024-76170-x.

Li W.-T., Jiang S.-Y., Su H.-M., Huang Q., Pi D.-H., Wang W., Xiao S. 2025. Dating a sedimentary manganese ore deposit using U-Pb geochronology of hausmannite (Mn_3O_4) by LA-ICP-MS: An example from Heqing Mn deposit, Yunnan Province, Southwestern China. Ore Geology Reviews. 183:106711. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2025.106711.

Liu G., Fu Y., Chen D.Z., Guo C., Tian F., Li C., Wei S. C., Jiang R., Yan S., Chen D., Chen. R. 2025. Direct Re-Os dating of manganese carbonate ores in Zunyi, Guizhou and implication for their genesis. Ore Geology Reviews. 180:106565. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2025.106565.

Liu P., Ding X., Liu Y., et al. 2024. Late Mesoproterozoic to Early Neoproterozoic Tectonic Evolution of the SW Yangtze Block, South China: Evidence from U-Pb Geochronology and Lu-Hf Isotopes of Detrital Zircons from Sedimentary Rocks. J. Earth Sci. 35:812–827. DOI: 10.1007/s12583-021-1563-3

Liu Z., Liu Y., Zhang S., Xiao L., Long J., Chen D., Wang Y., Wei Z., Zheng Y., Xiao L. 2025. A new exhalative sedimentary metallogenetic model for Permian manganese deposits in China. Journal of Asian Earth Sciences. 292:106740. DOI: 10.1016/j.jseaes.2025.106740.

Ma Z., Ling Y., Qin Y., Liu Y., Yao X., Wang P., Liu X. 2025. Paleo-ocean chemistry characteristics of the Cryogenian Datangpo Formation in South China and implications for manganese metallogenesis. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoe-

cology. 677:113212.
DOI:10.1016/j.palaeo.2025.113212.

Madondo J., Gyollai I., Fintor K., Szabó M., Bérczi S., Partida E. G., Canet C., Chacon E., Mishra S., Polgári M. 2025. Microbial mediation on the development of the Molango manganese ore Deposits, Mexico. Ore Geology Reviews. 185:106782. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2025.106782.

Mandal A., Tripathy G.R., Goswami V., Ackerman L., Parcha S.K., Chandra R. 2025. Re–Os and Sr isotopic study of Permian–Triassic sedimentary rocks from the Himalaya: shale chronology and carbonate diagenesis. Minerals 11.
DOI:10.3390/min11040417.

Nikulova N.Yu., Grakova O.V., Hubanov V.B. 2023. Morfologiya, stroenie i sostav tsirkona iz metapeschanikov alkesvozhskoy tolshchi (Pripolyarnyy Ural) [Morphology, structure, and composition of zircon from metasandstones of the Alkesvozhskaya sequence (Polar Urals)]. Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya. 22(2):99-106. DOI 10.17072/psu.geol.22.2.99. (in Russian)

Parfenov L.M., Popeko L., Tomurtogoo O. 2001. Problemy tektoniki Mongolo-Okhotskogo orogennogo poyasa [Problems of tectonics of the Mongol-Okhotsk orogenic belt]. Geology of the Pacific Ocean. 6:797-830. (in Russian).

Puetz S.J., Spencer C.J., Ganade C.E. 2021. Analyses from a validated global U-Pb detrital zircon database: Enhanced methods for filtering discordant U-Pb zircon analyses and optimizing crystallization age estimates. Earth-Sci. Rev. 220:103745. DOI: 10.1016/j.earscirev. 2021.103745.

Pystin A.M., Kushmanova E.V., Pystina Yu.I., Panfilov A.V., Potapov I.L. 2019. Vozrast protolitov i geokhronologiya metamorfizma Nerkayuskogo eklogit-slantsevogo kompleksa Pripolyarnogo Urala [Age of protolithes and geochronology of metamorphism of the Nerkayuskiy eclogite-schist complex of the Subpolar Urals]. Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya. 18(2):96-107. (in Russian) DOI 10.17072/psu.geol.18.2.96

Ronkin Yu.L., Maslov A.V., Sindern S. 2020. U-Pb (ID-TIMS) geokhronologicheskiy metod i SIMS priemy datirovaniya tsirkona “in situ”: vozmozhnosti i ogranicheniya [U-Pb (ID-TIMS) geochronological method and “in-situ” SIMS zircon dating: possibilities and constrains]. Lithosphere (Russia). 20(3):411-431. (in Russian) DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-3-411-431

Rooney A.D., Hnatyshin D., Toma J., Saintilan N.J., Millikin A.E.G., Selby D., Creaser R.A. 2024. Application of the ^{187}Re-^{187}Os geochronometer to crustal materials: Systematics, methodology, data reporting, and interpretation. GSA Bulletin. 136 (9-10): 4091–4129. DOI: 10.1130/B37294.1

Schmitz M.D., Kuiper K.F. 2013. High-precision geochronology. Elements. 9(1):25-30.

Smirnova Yu. N. 2020. Vozrast i geodinamicheskaya obstanovka formirovaniya nizhneyurskikh peschanikov Ononskogo fragmenta Aginskogo terreyna, Mongolo-Okhotskiy skladchatyy poyas [Age and geodynamic setting of the Lower Jurassic sandstones in the Onon fragments of the Aga terrane of the Mongol-Okhotsk fold belt]. Stratigraphy. Geological correlation. 30(3):25-40. (in Russian) DOI: 10.31857/S0869592X2203005X

Votyakov S.L. 2024. Aktualnye problemy v oblasti stroeniya, svoystv i metodov issledovaniya mineralov [Current problems in the field of structure, properties of minerals, and methods of their investigation]. Lithosphere (Russia). 24(2):203-213. DOI: 10.24930/1681-9004-2024-24-2-203-213 (in Russian)

Wu Y., Fang X., Ji J. 2023. A global zircon U–Th–Pb geochronological database. Earth Syst. Sci. Data. 15:5171–5181. DOI: 10.5194/essd-15-5171-2023

Yang G., Hannah J.L., Zimmerman A., Stein H.J., Bekker A. 2009. Re–Os depositional age for Archean carbonaceous slates from the southwestern Superior Province: Challenges and insights. Earth and Planetary Science Letters. 280(1–4):83-92, DOI: 10.1016/j.epsl.2009.01.019.

Yang G., Zimmerman A., Hurtig N.C., Georgiev S.V., Goswami V., Hannah J.L., Stein H.J. 2020. Chemical procedures for rhenium extraction from geological samples: optimising the anion resin bead clean-up step. Geostand. Geoanal. Res. 44(2):231-242 DOI:10.1111/ggr.12318.