

Отзыв официального оппонента

на диссертационную работу ТОКАРЕВА ИГОРЯ ВЛАДИМИРОВИЧА «Изотопная реконструкция происхождения, эволюции и оценка текущего состояния водно-ледовых объектов», представленную на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук по специальности 1.6.6. Гидрогеология.

Актуальность и научная значимость диссертационного исследования определяется необходимостью создания эффективных инструментов для оценки возраста и генезиса водно-ледовых объектов, скорости и направления эволюции процессов в гидросфере. Предмет исследования – изотопы, цель – теоретическое и экспериментальное обоснование способов применения изотопно-геохимических и геохронологических методов для реконструкции происхождения, эволюции, оценки текущего состояния и прогноза изменения характеристик объектов под действием природных и антропогенных факторов. Элемент прогноза включен как дополнение–сверхзадача к реконструкциям природных обстановок, которые осуществляются в диссертации.

Диссертационная работа выполнена по материалам, собранным и обработанным И.В. Токаревым с применением комплекса методов: изотопов водорода ($^1,^2,^3\text{H}$), кислорода ($^{16},^{18}\text{O}$), урана ($^{234},^{238}\text{U}$) и благородных газов ($^3,^4\text{He}$, ^{20}Ne , ^{36}Ar). В ней использовались современные методы измерений, стандартные и собственные методы отбора проб и подготовки их к анализу, разрабатывались оригинальные подходы к интерпретации полученных данных. Автор использовал несколько тысяч собственных изотопных и химических анализов, относящихся к десяткам участков исследований в пределах северной части Евразии, а также большой объем опубликованных результатов для остальной части Мира. Работа проводилась при поддержке научных фондов и коммерческих проектов.

Практическая значимость работы определяется задачами, которые требуют решения вследствие деградации евразийского пятна мерзлоты во время голоценового потепления. В диссертации определяются количественные характеристики этого процесса на основе выполненных комплексных фундаментальных исследований, построения климатических моделей и конкретных прикладных работ, направленных на обоснование прогноза условий хозяйствования в арктическом и субарктическом регионах. Результаты работы могут быть использованы для оценки интенсивности таяния вечной мерзлоты, пригодности условий захоронения вредных веществ в подземной гидросфере.

Диссертация включает 3 раздела. Два из них составляют том 1, третий – том 2.

Первое защищаемое положение (раздел I, подразделы I.1–I.2) определяет научную новизну, связанную с необходимостью учитывать усечение синусоидальной формы входной функции, описывающей содержания изотопных трассеров ($^{1,2,3}\text{H}$, $^{16,18}\text{O}$, $^{3,4}\text{He}$, ^{20}Ne) в водах, питающих водно-ледовые объекты вне зоны сплошного распространения мерзлоты. И.В. Токаревым показано, что данные процессы приводят к рассогласованию между оценками температур в период восполнения влагозапасов, которые получаются по стабильным изотопам и благородным газам. При наличии неравновесного фракционирования изотопов водорода и кислорода водно-ледовых объектов за счет частичного испарения и замерзания возможность использования стабильных изотопов для оценки температур и связанных с этим построений полностью исключена. Преобразования входного сигнала накладывают существенные ограничения на тритиевый метод датирования, который дает только полуколичественные оценки возраста подземных вод, если отсутствует учет количеств дочернего тритийгенного гелия-3.

Во втором положении И.В. Токаревым защищается оригинальная гипотеза о происхождении больших избытков ^{234}U в результате накопления в пленочной влаге мерзлых грунтов в ледниковые периоды с высвобождением при их таянии (раздел I, подраздел I.3 и подраздел II.6).

В подразделе I.3 рассматриваются теоретические вопросы, связанные с применением четных изотопов урана (^{234}U , ^{238}U) для изучения деградации мерзлоты. Выдвинуто предположение о том, что урановые избытки урана-234 ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U} > 10$ в активностях) в подземных водах обусловлены его накоплением в пленочной влаге мерзлых грунтов в ледниковые периоды с последующим его высвобождением при таянии мерзлоты. Оно вполне логично и не противоречит модели Чердынцева-Чалова и множеству работ, изучающих механизмы фракционирования ^{234}U – ^{238}U в природных водах и вмещающих породах, однако это предположение пока имеет лишь косвенные подтверждения по натурным наблюдениям и результатам моделирования, в том числе проведенным самим автором. Из-за сложности и неоднозначности процессов фракционирования изотопов урана в природных средах было бы желательно провести прямые эксперименты по таянию древней мерзлоты и определению кинетики выхода изотопов урана. В любом случае, следует с осторожностью переносить результаты, полученные в регионах со сплошным развитием вечной мерзлоты, на районы с ее слабым распространением и тем более с ее отсутствием.

В подразделе II.6 И.В. Токарев дает обзор конкретных исследований природных условий формирования избытков ^{234}U в подземных водах. Приводит результаты

исследований эффекта отжига альфа-треков с выщелачиванием по водным вытяжкам из материала мелкораздробленных гранитов разного состава, гранито-гнейса и габброида с целью зарегистрировать снижение эффекта Чердынцева-Чалова вследствие удаления треков. Получает устойчивое снижение отношения активностей $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ в водных вытяжках из восьми образцов горных пород.

Обращаясь далее к рассмотрению поведения ^{234}U в природных резервуарах И.В. Токарев, прежде всего, приводит свои материалы по подземным водам Ленинградской области. Исследует пресную и минеральную воду (минерализация до 1.5 г/дм^3). В современных пресных водах вендского водоносного комплекса определяет низкие значения отношения активностей $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ($0.94\text{--}1.15$), в минерализованных захороненных водах (возраст ^{14}C 9–15 тыс. лет) широкий диапазон этого показателя от значений меньше 1 до 25. Приводит подобные результаты для подземных вод Карелии, Мурманской, Архангельской областей, Полярного Урала, Чукотки, Томской области, Поволжья и Крыма. Для оценки современного или реликтового происхождения подземных вод Игорь Владимирович использует не только общую минерализацию, но и наличие трития от наземных атомных взрывов 1960-х гг. и датировки ^{14}C . В интерпретации данных по реликтовым водам в каждом случае он подразумевает возрастание отношения активностей $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ при таянии мерзлоты. Подземные воды Крыма с экстремально легким изотопным составом водорода и кислорода он принимает как пример территории, на которой в последний ледниковый период отсутствовала мерзлота.

Один из объектов, которому соискатель уделяет внимание, – вода оз. Байкал (стр. 138–139). В качестве иллюстрации временных откликов на изменение климата в последние 150 тыс. лет он приводит графики «индекса $\delta^{18}\text{O}$ » и $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ в донных осадочных отложениях керна скважины (график изотопного состава урана приводит по данным Е.П. Чебыкина). Смысл «индекса $\delta^{18}\text{O}$ » не поясняет. Далее дает краткие сведения по изотопным характеристикам урана подземных вод Северной Америки, и других регионов Мира. Делает общий вывод об отсутствии сильно неравновесного урана (отношения активностей $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} > 10$) в подземных водах равнин и низкогорий полосы $40^\circ\text{с.ш.} - 40^\circ\text{ю.ш.}$ Обсуждает вопросы, касающиеся изотопного состава урана в водах морей, гидротермальных систем, сейсмически активных областей. Приводит и обсуждает случаи значений отношения активностей $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ в подземных водах меньше 1.

В третьем защищаемом положении научная новизна определяется приложением неон-гелиевой изотопной систематики для генетических построений в гидрогеологической практике (раздел I, подраздел I.4). Автором разработан метод датирования молодых и древних подземных вод с выявлением их вкладов при смешении.

Метод основан на использовании неон-гелиевой систематики ($^3\text{He}/^4\text{He} - ^{20}\text{Ne}/^4\text{He}$) с учетом ряда дополнительных условий. Создана математическая модель, определены ограничения и условия применимости метода.

В четвертом защищаемом положении научная новизна определяется разбором примеров эффективного комплексирования изотопных трассеров для решения различных гидрогеологических задач (раздел III). В рассмотрение вовлечены данные по замкнутым межгорным структурам гумидных и аридных климатических обстановок (Хибинский массив на Кольском п-ове в России; бассейн р. Нарын в Киргизии и микробассейны Sierra de los Filabres провинции Альмерия в Испании), по пластовым структурам (северо-запад РФ, юго-восток Западной Сибири, Предволжье, равнинный Крым) и по гидрогеологическим массивам и вложенным структурам (Карелия, Нижне-Канский гранитоидный массив, Теча-Бродская структура).

Замечания:

1. На рис. I.2.2. Метаморфизация изотопного состава воды при наличии вторичных процессов в тексте обсуждается только диаграмма панели а) «состав осадков в регионах». Диаграмма панели б) «влияние на изотопный состав воды прочих процессов» не обсуждается и в контексте диссертации представляется излишней.

2. Эксперименты с отжигом альфа-треков в подразделе II.6 не имеют непосредственного отношения к изучению водно-ледовых объектов. Природные процессы, соответствующие выполненным экспериментам, не определяются. Эта информация была бы уместна в теоретическом подразделе I.3.

3. В изложении материалов подраздела II.6 по изотопному составу U в подземных водах отсутствует информация о концентрации U и другие дополнительные характеристики (например, состав пород, вмещающих подземные воды), что затрудняет понимание возможных причин повышенной минерализации подземных вод.

4. Низкое отношение активностей $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ (1.59) определяется в Крыму для термальных минеральных вод села Пятихатка. Подобное низкое отношение активностей $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ характерно в целом для термальных вод, связанных с поступлением флюидов из глубоких резервуаров (например, низкие значения $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ (1.6–1.8) при высоком $^3\text{He}/^4\text{He}$ (около 10^{-5}) имеют термальные воды курорта Аршан Тункинской долины Байкальской рифтовой системы).

5. Наблюдаемые небольшие избытки урана-234 в большинстве поверхностных и подземных вод бассейна оз. Байкал могут быть объяснены стандартной моделью Чердынцева-Чалова без привлечения процессов таяния мерзлоты. Для оценки её

возможных вкладов необходимо применение комплекса изотопных методов, рассмотренных в данной работе.

6. График «индекса $\delta^{18}\text{O}$ », представленный для донных отложений Байкала, для решения задач палеоклиматических реконструкций не выразителен. При организации работ по проекту «Байкалбурение» в начале 1990-х годов предполагалось определить палеоклиматические вариации для внутренней части континента по изотопному составу кислорода в карбонатах донных отложений по аналогии с определением морских изотопных стадий (МИС). Карбоната в керне не оказалось, поэтому в качестве альтернативных климатических сигналов эффективно использовались диатомовые водоросли и изотопный состав аутигенного урана.

7. Интерпретация Е.П. Чебыкина изотопного состава аутигенного урана в керне донных отложений Среднего Байкала исходит из оценок меняющегося с течением времени вклада в оз. Байкал рек Селенга и Верхняя Ангара. В интервалы похолодания МИС 2 и МИС 4 сток в Байкал вод Селенги с повышенным $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ (около 2 в активностях) отсутствовал. Осуществлялся сток вод Верхней Ангары с низким $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ (около 1.2 в активностях). В данном случае U-изотопная характеристика осадочных отложений отражает преобладающее движение вод из разных частей водосбора Байкала и не может рассматриваться в качестве прямого климатического отклика с его поверхности.

8. На рис. П.6.10 вводится параметр $\delta^{234}\text{U}_{\text{нач}}$ в ‰ без пояснения способа расчета.

9. Для Полярного Урала делается вывод о пике активности источников по $^{230}\text{Th}/\text{U}$ датировкам травертинов около 2.0–7.7 тыс. лет назад и о времени пребывания растворов в системе по ^{14}C датировкам – 5.0–7.9 тыс. лет (стр. 136). Какой смысл имеют датировки ^{14}C , если система оставалась открытой? Достигалось ли где-нибудь согласование датировок резервуаров подземных вод разными радиоизотопными методами? Вводились ли при датировании методом ^{14}C поправки на присутствие в подземных водах современных микроорганизмов?

Все замечания имеют уточняющий характер. Четыре защищаемых положения диссертации охватывают ключевые вопросы происхождения, эволюции и оценки текущего состояния водно-ледовых объектов, хорошо обоснованы и отражают суть всего исследования.

Заключение по диссертации:

Работа представляет собой крупное научное достижение в области изотопной гидрогеологии, соответствующее требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям. Достоверность выводов определяется применением современных геохимических методов. Личный вклад И.В. Токарева в изотопные реконструкции

происхождения, эволюции и оценку текущего состояния водно-ледовых объектов заключается в первичном полевом отборе образцов, получении аналитических данных и обобщении полученных материалов. Список публикаций по теме диссертации содержит 7 монографий и 84 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России. Материалы диссертации прошли апробацию на многочисленных конференциях российского и международного уровня. Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации. Токарев Игорь Владимирович заслуживает присуждения ученой степени доктора геолого-минералогических наук по специальности 1.6.6. Гидрогеология.

Официальный оппонент:

Рассказов Сергей Васильевич, доктор геол.-мин. наук, профессор, зав. лабораторией изотопии и геохронологии, Институт земной коры СО РАН, 664033, crust.irk.ru, Иркутск ул. Лермонтова 128, зав. кафедрой динамической геологии, геологический факультет Иркутского государственного университета, rassk@crust.irk.ru, 8(3952-51-16-59)

Я, Рассказов Сергей Васильевич, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой Диссертационного совета и их дальнейшую обработку.

24 марта 2025 г.


Подпись Рассказов СВ
заверяю
Специалист по документообороту Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института земной коры Сибирского отделения Российской академии наук
Тыркова М.Г.
24.03.2025 г.

Рассказов Сергей Васильевич

