

Байкал: землетрясения можно предсказать

М. А. ГРАЧЕВ, С. В. РАСКАЗОВ

9 декабря 2020 г. вблизи Байкала произошло довольно сильное, хотя и неопасное землетрясение. Случилось оно в знаменитом заливе Провал, где в 1862 г. прямо на глазах у изумленной публики земля на огромной площади провалилась под воду. Как потом выяснилось, на несколько метров. Последнее землетрясение пришлось кстати: оно дало иркутским ученым возможность получить убедительные доказательства того, что они стоят на правильном пути в очень амбициозном проекте – создании модели, позволяющей предсказывать будущие землетрясения

Ключевые слова: Байкал, подземные воды, землетрясения, $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, эффект Чердынцева – Чалова, гидроизотопный мониторинг.

Key words: Baikal, groundwater, earthquakes, $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, Cherdyntsev – Chalov effect, hydroisotopic monitoring



ГРАЧЕВ Михаил Александрович – академик РАН, доктор химических наук, директор Лимнологического института СО РАН (Иркутск) с 1987 по 2015 г. Принимал активное участие в подготовке Закона об охране озера Байкал. Лауреат Государственной премии СССР (1985 г.), премии им. А. П. Карпинского (1998 г.). Автор и соавтор 153 научных работ

© М. А. Грачев, 2021

Путь к созданию новой модели, предсказывающей землетрясение, был долгим. Когда коллеги сказали мне, что хотят это сделать, я им, естественно, не поверил – ведь над проблемой точного предсказания землетрясений бьются буквально тысячи ученых из разных стран мира, и впереди всей планеты – японцы. И поэтому – так я думал – шансы у коллег исчезающе малы. Оказалось, что правы они, а я не прав. Хорошо, что я эту работу не запретил, хотя имел такую возможность.

Итак, с точки зрения фундаментальной науки произошел крупный прорыв, как раз то, о чем мечтают наши уважаемые руководители. Но поскольку они не ученые и имеют полное право этого не понимать, надо им помочь. И еще хотелось бы рассказать об этом обычным людям, в особенности ученикам старших классов.

Точка отсчета – Атомный проект

Дорога была длинной. В конце Второй мировой войны американцы взорвали атомные бомбы в Хиросиме и Нагасаки. Я родился в 1939 г., и до 1944 г. мы с мамой и бабушкой жили в Новосибирске, в эвакуации. В тот год маме было предписано ехать в США, где в командировке находился отец.

Когда я услышал по радио о том, что американцы взорвали атомные бомбы, я спросил у папы, есть ли такая бомба у Сталина. Он ответил: «Конечно есть, сынок». На самом деле у Сталина бомбы не было – появилась она в 1949 г. Урана в СССР оказалось очень мало – не хватало даже на одну бомбу. Его нашли в оккупированных тогда Германии и Чехословакии. Степень секретности была высочайшей, даже слово «уран» нельзя было произносить.

Атомным проектом в СССР руководил Лаврентий Берия. Он умел отдавать приказы. Всем советским геологическим экспедициям было предписано иметь с собой в сейфе наган и счетчик радиоактивности, а также секретный приказ, напоминавший о том, что все должны искать уран. Было создано

Байкал. Фото С. Короткоручко

несколько специальных мощных управлений только для того, чтобы его найти. Всю эту громадную работу было бы невозможно провернуть, если бы в ней не участвовали самые талантливые ученые, виднейшие деятели советской фундаментальной науки. Когда уран был найден, некоторые из них в свободное от работы время выполняли несекретные фундаментальные исследования.

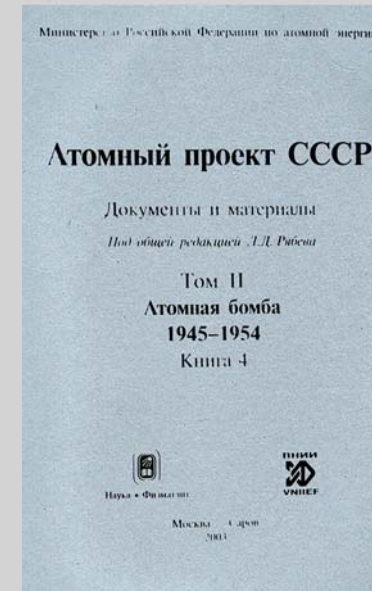
Нашу историю мы должны начать с признанных в мировом масштабе очень крупных советских радиохимиков – Чердынцева и Чалова.

Прошу прощения у читателей за то, что здесь перечислено много скучных фамилий, придется потерпеть. Гомер в своей «Илиаде» привел имена всех героев, которые явились на войну с Троей. Нам эти имена не важны, но древним грекам они были очень важны.

Дальше я буду писать об изотопах урана и о том явлении, которое открыли Чердынцев и Чалов. Описать это словами для рядового читателя, да и для рядового постороннего ученого очень трудно. Мне лично потребовался год, чтобы понять, о чем идет речь. Ну, с Богом...

Урановые «часы»

Когда-то очень давно родилась и стала твердым телом Земля. Взрыв был ядерный, поэтому почти все элементы были радиоактивными, и за миллиарды лет почти все они стали нерадиоактивными. До наших дней могли дожить, кажется, только уран и торий – самые тяжелые, последние в таблице Менделеева. Через миллиарды лет радиоактивными остались изотопы урана с атомными массами 238, 235 (он нужен для бомбы) и 234.



Заготовка высокообогащенного урана, полученного из переработанного лома. Public Domain





В.В. Чердынцев (слева) в 1954 г. совместно со своим учеником П.И. Чаловым (справа) открыл эффект естественного разделения изотопов урана ^{234}U и ^{238}U , названный в честь первооткрывателей

Виктор Викторович ЧЕРДЫНЦЕВ в 1931–1944 гг. работал лаборантом в Ленинградском радиевом институте в отделе академика Вернадского. В 1935 г., после очередного ареста отца, выслан из Ленинграда в Ташкент «как социально опасный элемент». После ходатайства В.И. Вернадского и его заместителя В.Г. Хлопина решение о высылке было отменено. По возвращении в Ленинград продолжил работу в Радиевом институте. Во время войны в эвакуации в Татарстане работал в районе Чистополя начальником экспедиции Радиевого института и заведующим радиологической лабораторией. Проводил радиологические исследования на нефтяных месторождениях. Обобщив опыт этих исследований, подготовил и осенью 1943 г. защитил кандидатскую диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. В 1944–1950 гг. работал заместителем директора Института астрономии и физики АН Казахской ССР (Алма-Ата), где организовал первую в Казахстане ядерную лабораторию. В феврале 1946 г. защитил докторскую диссертацию по теме «Теория происхождения атомных ядер». Одновременно с работой в институте в 1946–1960 гг. заведовал кафедрой экспериментальной физики Казахского государственного университета, где организовал специализацию по ядерной физике и проблемную лабораторию по исследованию ядерных процессов в природе и космических лучах. Вместе со своим учеником и коллегой по Казахскому государственному университету П.И. Чаловым открыл эффект разделения изотопов урана, получив свидетельство об открытии № 163 с приоритетом от 27 марта 1954 г. Павел Иванович ЧАЛОВ – участник войны, в РККА с декабря 1941 г., в действующей армии с апреля 1942 г. Удостоен боевых наград. Окончил Казахский государственный университет (1951) и его аспирантуру (1954)

Уран-238 продолжает распадаться и сегодня. Его очень много по массе, но скорость распада очень мала. Чтобы распасться наполовину, ему нужно 4,5 млрд лет. Считается, что Земля в более или менее современном виде появилась как раз около 4,5 млрд лет назад. Радиоактивность дает в руки исследователей очень важный инструмент: представьте себе, что каждый распавшийся атом может быть измерен с помощью очень простого прибора – *ионизационной камеры*. Кстати, первое, хотя и не очень точное определение возраста Земли было сделано Артуром Холмсом еще в 1927 г.

Все остальные изотопы урана появились позже, и поэтому для нас важны только два – 238 и 234. Период полураспада урана-234 составляет всего 250 тыс. лет. Казалось бы, он тоже должен был давно исчезнуть из горных пород, но он не исчезает, потому что постоянно образуется из урана-238. Интересно и очевидно, что радиоактивность урана-238 и урана-234 может быть только одинаковой. (Радиоактивность – это число распадов в единицу времени на единицу массы. Радиохимики все измеряют не в граммах, а в единицах радиоактивности, наверное затем, чтобы нам, бедным «чайникам», было труднее. Они говорят, что обычно в уране уран-урановое отношение (уран-234/238) равняется единице. Это птичий язык, язык профессионалов, понять его трудно, но постараемся.)

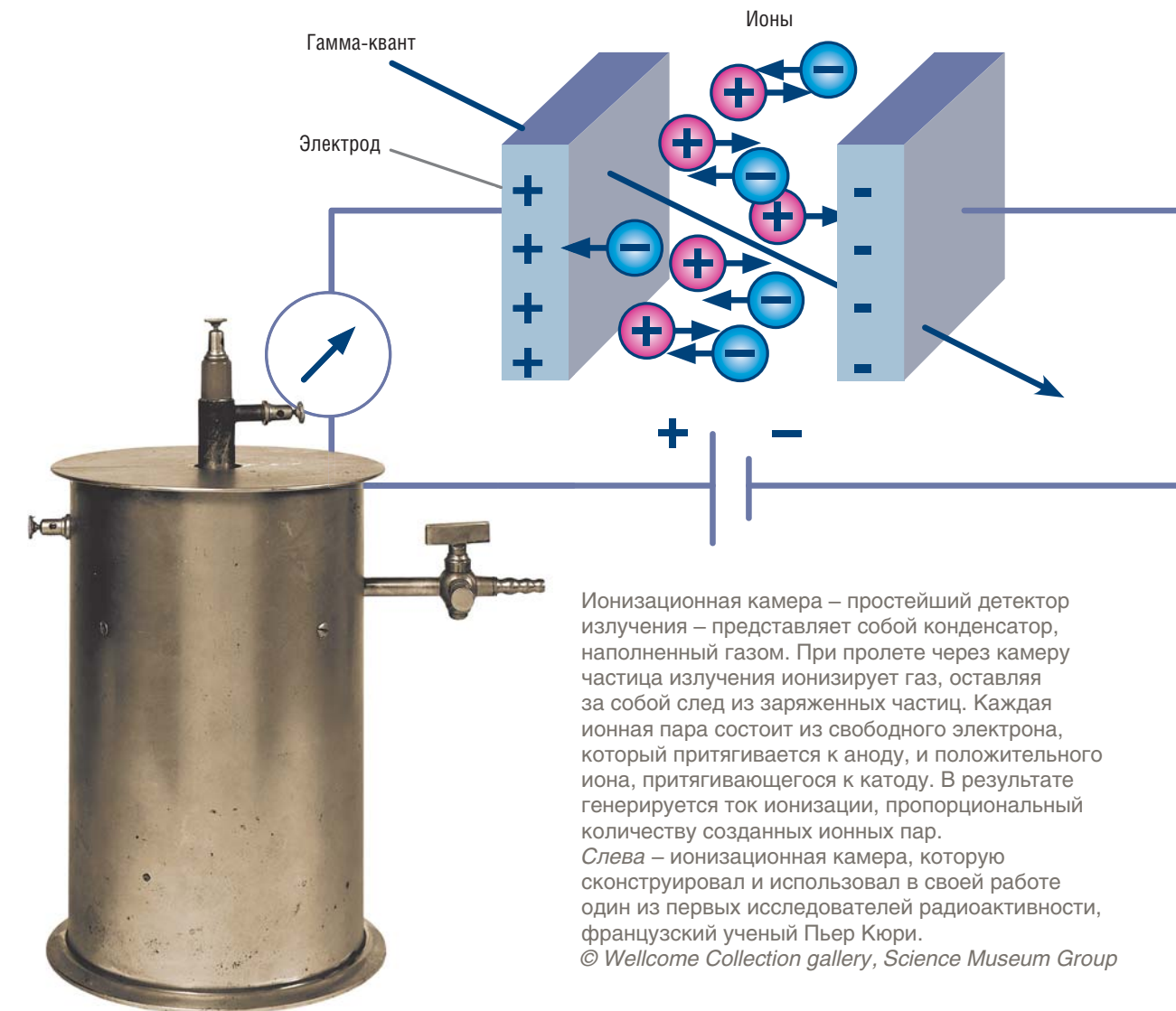
Каждый школьник знает, что различные изотопы всех элементов совершенно не отличаются друг от друга по химическим свойствам, потому что электронная оболочка у них одинаковая, а ядра могут быть разными.

Чердынцев и Чалов, безусловно, искали месторождения урана для атомных бомб, но они были настоящие ученые, а поэтому в нерабочее время не отдыхали, а измеряли уран-урановые отношения у великого множества образцов пород и подземных вод. В породах, как и следовало ожидать, уран-урановое соотношение равнялось 1. К их полному изумлению, в некоторых образцах взвеси из воды, полученной из скважин, это соотношение было намного больше 1. Рекорд урана-234/238 равнялся 18! Никто в мире до них такого не наблюдал.

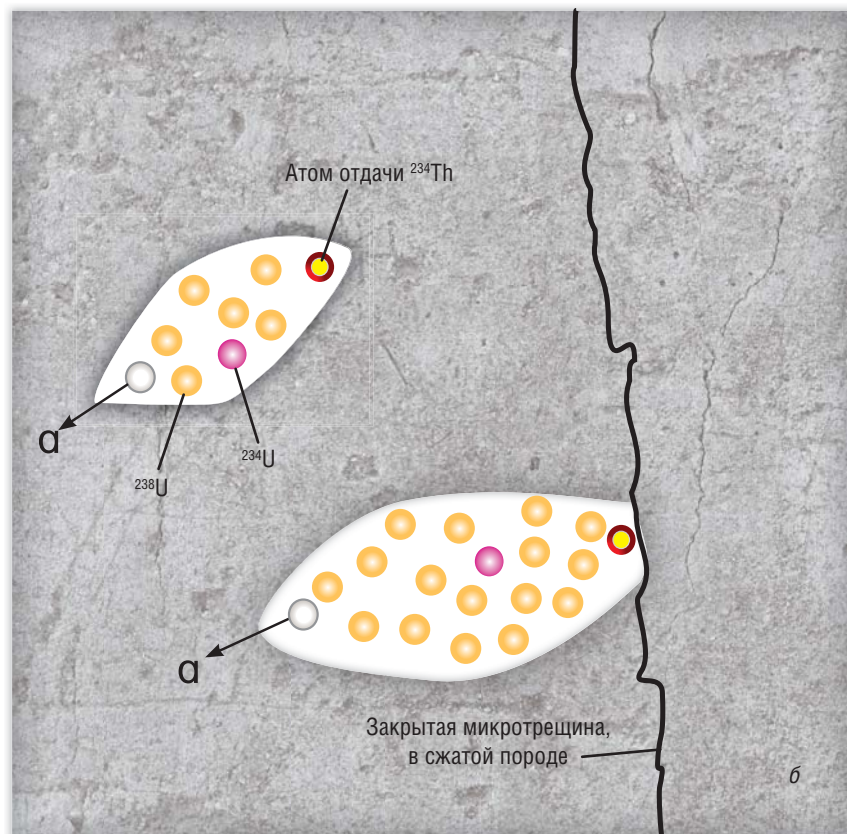
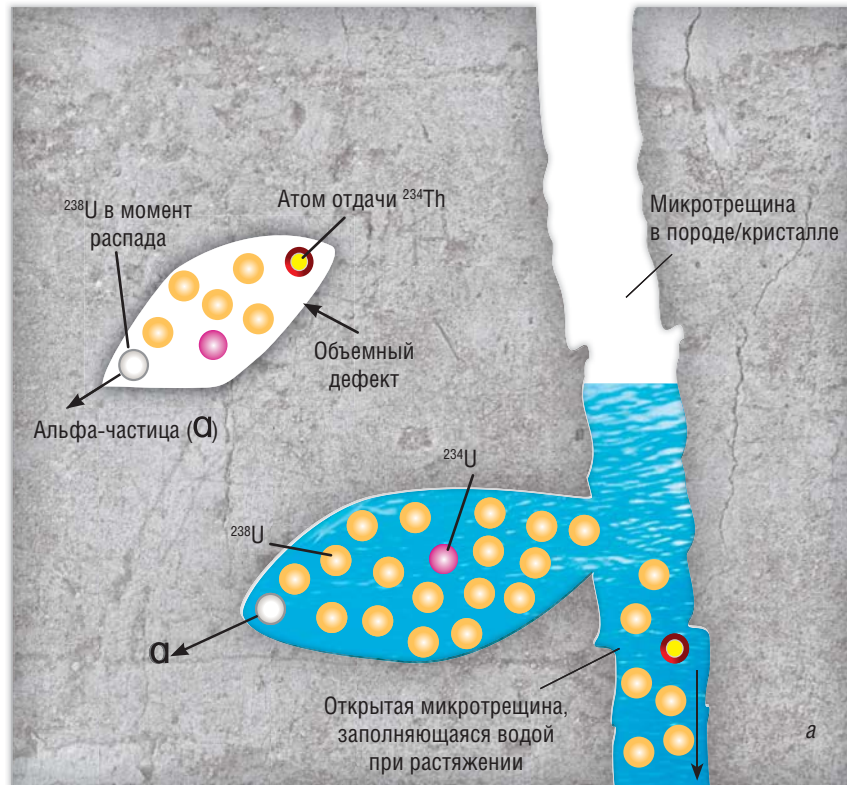
Чердынцев объяснил это явление так: когда атом урана распадается, он оставляет за собой в горной породе трек – наноразмерный цилиндр, заполненный водой. Он понял, что в этом цилиндре и должен оставаться только что родившийся в результате распада урана-238

пока еще высокорadioактивный дочерний атом урана-234. Далее, протекающие вокруг трека грунтовые воды вымывают уран, и эта вода попадает в пробоотборник, а потом и в детектор радиоактивности, ионизационную камеру.

Эксперименты Чердынцева и Чалова описаны чрезвычайно понятным языком, неслучайно их описание на русском языке вскоре стало очень широко применяться во всем мире для приблизительного определения возраста подземных вод и горных пород в диапазоне от 10 до 500 тыс. лет. Это искусство давно утеряно. Например, для идентификации импульсов радиоактивности именно урана-234 и урана-238 они использовали просто папиросную бумагу разной толщины.



Ионизационная камера – простейший детектор излучения – представляет собой конденсатор, наполненный газом. При пролете через камеру частица излучения ионизирует газ, оставляя за собой след из заряженных частиц. Каждая ионная пара состоит из свободного электрона, который притягивается к аноду, и положительного иона, притягивающегося к катоду. В результате генерируется ток ионизации, пропорциональный количеству созданных ионных пар. Слева – ионизационная камера, которую сконструировал и использовал в своей работе один из первых исследователей радиоактивности, французский ученый Пьер Кюри. © Wellcome Collection gallery, Science Museum Group



Эффект естественного разделения изотопов урана-234 и урана-238 (эффект Чердынцева – Чалова) при их переходе из твердых образований в жидкости объясняется открытием-закрытием микротрещин горной породы. Высокоэнергетические атомы отдачи тория-234, образующиеся при альфа-распаде урана-238, разрушают кристаллическую решетку, формируя в ней полости (объемные дефекты). В свою очередь, торий-234 в результате бета-распада превращается в уран-234. Таким образом изотопное соотношение урана в разрушенных областях смещается – создается избыток урана-234. При открытых микротрещинах аналогично меняется и изотопное соотношение урана в циркулирующих подземных водах (а). При закрытых микротрещинах этого не происходит (б)

Точка приложения – Байкал

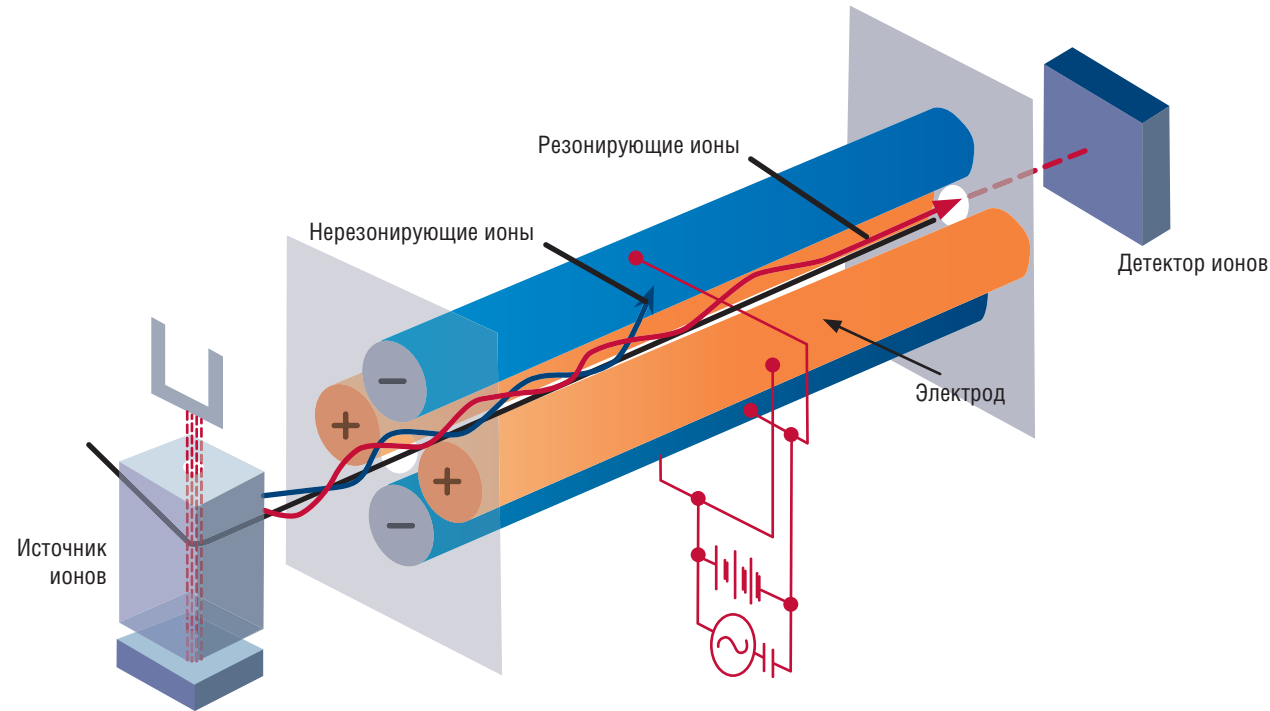
Теперь я вынужден отвлечься от Чалова и Чердынцева и вернуться в Иркутск, на Байкал. Во времена, когда я был директором Лимнологического института. В начале лихих 1990-х можно было делать все, и на Байкал хлынуло огромное число хороших иностранных, особенно американских, ученых. Немудрено: впервые Байкал стал совершенно открытым для иностранцев, а при советской власти из-за режима секретности был практически закрыт.

И следующая важнейшая фигура в моем рассказе – один из таких ученых из Института воды Великих озер (Висконсинского института водных технологий и исследований окружающей среды), г. Милуоки, уже тогда довольно пожилой, недавно ушедший из жизни профессор Дэвид Эджингтон. В то время мы интенсивно исследовали Байкал, в особенности его донные осадки, и я совсем мало понимал в этом деле. Эджингтон и еще один американец – Стив Колмэн объяснили мне, что такое урановое равновесие, написали первую статью об уран-ториевой датировке осадков Байкала

Мыс Бурхан – одно из самых красивых и известных мест на Байкале.
© CC BY 2.0/ Michael Ravodin

и датировали осадки, выпавшие в очень важные для понимания эволюции нашего священного озера интервалы времени от 10 до 150 тыс. лет назад. Оказалось, что, используя то же самое отношение уран-234/238, можно не только датировать возраст осадка, но и получить представление о выпадении атмосферной влаги в центре Азии.

Прошло еще некоторое время. В моем институте, будучи еще студентом, появился Евгений Чебыкин, который оказался человеком чрезвычайно редкой природы – высококлассным химиком-аналитиком. В то сумасшедшее время нам удалось приобрести очень дорогой аналитический прибор – *квадрупольный масс-спектрометр с плазменным возбуждением*, на международном птичьем языке – ИСП-МС. Каким-то образом мне попался в руку проспект этого прибора,



Квадрупольный масс-спектрометр с плазменным возбуждением используется для определения элементного состава вещества в очень низких концентрациях. Для этого пробу (аэрозоль, пар, газ) вводят в источник ионов, состоящий из плазменной горелки и индуктора, создающих с помощью высокочастотного генератора разряд индуктивно связанной плазмы. Анализируемое вещество переходит в состояние плазмы, образующиеся положительные ионы ускоряются электрическим полем и фокусируются в пучок. Далее ускоренные ионы разделяются по массе с помощью квадрупольного масс-анализатора путем изменения потенциала на электродах. Резонирующие ионы попадают в детектор, где генерируют ионный ток, который можно измерить

рассмотрев который, я понял, что с его помощью можно измерять урановые отношения не по радиоактивности, что очень трудно и очень медленно, а за считанные минуты вместо нескольких суток с помощью той техники, которую применяли Чердынцев и, как ни странно, Эджингтон и Колмэн.

Это было необычно: я не выпрашивал прибор у московских чиновников в надежде потом использовать его как бог на душу положит, я заказал прибор именно для измерения уже навязшего вам в зубах уран-уранового отношения. Как в сказке: сначала родилась идея, и только после этого в лаборатории у нас появился прибор. ИСП-МС будет часто упоминаться ниже по ходу моего рассказа, он позволяет одновременно измерить концентрацию практически всех элементов таблицы Менделеева и настолько чувствителен, что может измерить исчезающе малую концентрацию урана-234.

Чебыкин быстро освоил наш ИСП-МС и, к моему удивлению, все необходимые сложнейшие методики применения уран-уранового датирования. Методом Чердынцева – Чалова уже пользовался весь мир, методики были описаны в литературе, но анализ

на ИСП-МС – это исключительно тонкое дело, которое по плечу только аналитикам с большой буквы, отличающимся все как один скверным характером. Такова жизнь.

Эджингтон и Колмэн на всем протяжении 10-метрового керна смогли измерить уран-урановое отношение всего в 4–5 точках, а Чебыкин продатировал керн в точках с шагом в 2 см с разрешением в 200 лет на интервале 10–140 тыс. лет. Анализ керна со столь высоким разрешением было бы совершенно невозможно провести древним радиометрическим методом. Но это присказка, не сказка, сказка будет впереди.

Как-то вскоре в институте совершенно неожиданно появился очень хороший физик. Его, как это у нас водится, прогнали из новосибирского Института химии твердого тела и переработки минерального сырья СО АН СССР за то, что он изобрел оригинальную методику аэродинамического разделения нанометровых промышленных алмазов. Очень скоро он подключился к нашей работе и внес в нее неоценимый вклад. К сожалению, он тоже не так давно ушел от нас и оставил Чебыкина сиротой, бедному даже поговорить не с кем.



Евгений Львович Гольдберг очень быстро уточнил модель Чердынцева – Чалова. Уточнение кажется небольшим, но на самом деле именно оно внесло важнейший кирпич в наблюдения уран-урановых гидроизотопных откликов землетрясений. Согласно Гольдбергу, подземные воды, текущие мимо, не выносят неравновесный уран из трещин – чтобы его вынести, нужно осадок измельчить. Откуда же могло взяться такое истирание в глубоких подземных горизонтах, где нет ни людей, ни агатовой ступки? Окончательно доказать свою теорию Гольдберг не успел, но Чебыкин стал работать вместе с очень грамотным геологом Сергеем Рассказовым, знаменитым, в частности, своими исследованиями землетрясений в Институте земной коры СО РАН, также расположенном в иркутском Академгородке. Рассказов оказал огромную помощь уже тем, что ознакомился с упомянутыми выше тонкими радиохимическими и радиогеологическими исследованиями, хотя никогда раньше этими дисциплинами не интересовался.



Недавнее иркутское землетрясение позволило проверить модель Гольдберга профессионально. Рассказов и Чебыкин в течение многих лет упорно проводили гидроизотопный мониторинг в окрестностях Байкала, каким-то образом определили тектоническое состояние и высказали гипотезу о положении эпицентров грядущих землетрясений. Имеющегося на сегодня опыта еще недостаточно, чтобы точно датировать и локализовать предсказанные землетрясения, но ясно видно, что ребята стоят на правильном пути. Об этом подробнее они расскажут вам сами.

Поэтому я даю слово Сергею Рассказову. Уверю вас, что это – прорывное достижение уровнем гораздо выше мирового. Путь к точному прогнозу землетрясений открыт, лет через десять, я думаю, он будет пройден.

Освоить и применить сложнейшие методики уран-уранового датирования в Лимнологическом институте удалось благодаря канд. хим. наук Евгению Павловичу Чебыкину, ныне – старшему научному сотруднику лаборатории биогеохимии ЛИН СО РАН и лаборатории изотопии и геохронологии Института земной коры СО РАН (Иркутск), и канд. физ.-мат. наук Евгению Львовичу Гольдбергу, работавшему в ЛИН с 1994 г., в том числе руководителем лаборатории палеоклиматологии в 2003–2006 гг. С 2005 г. основным местом его работы был Институт археологии и этнографии СО РАН, где он руководил созданием ЦКП «Геохронология кайнозоя». Евгений Львович ушел из жизни в 2011 г.





РАССКАЗОВ Сергей Васильевич – доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий лабораторией изотопии и геохронологии Института земной коры СО РАН (Иркутск) и кафедрой динамической геологии геологического факультета Иркутского государственного университета. Автор и соавтор более 550 научных работ

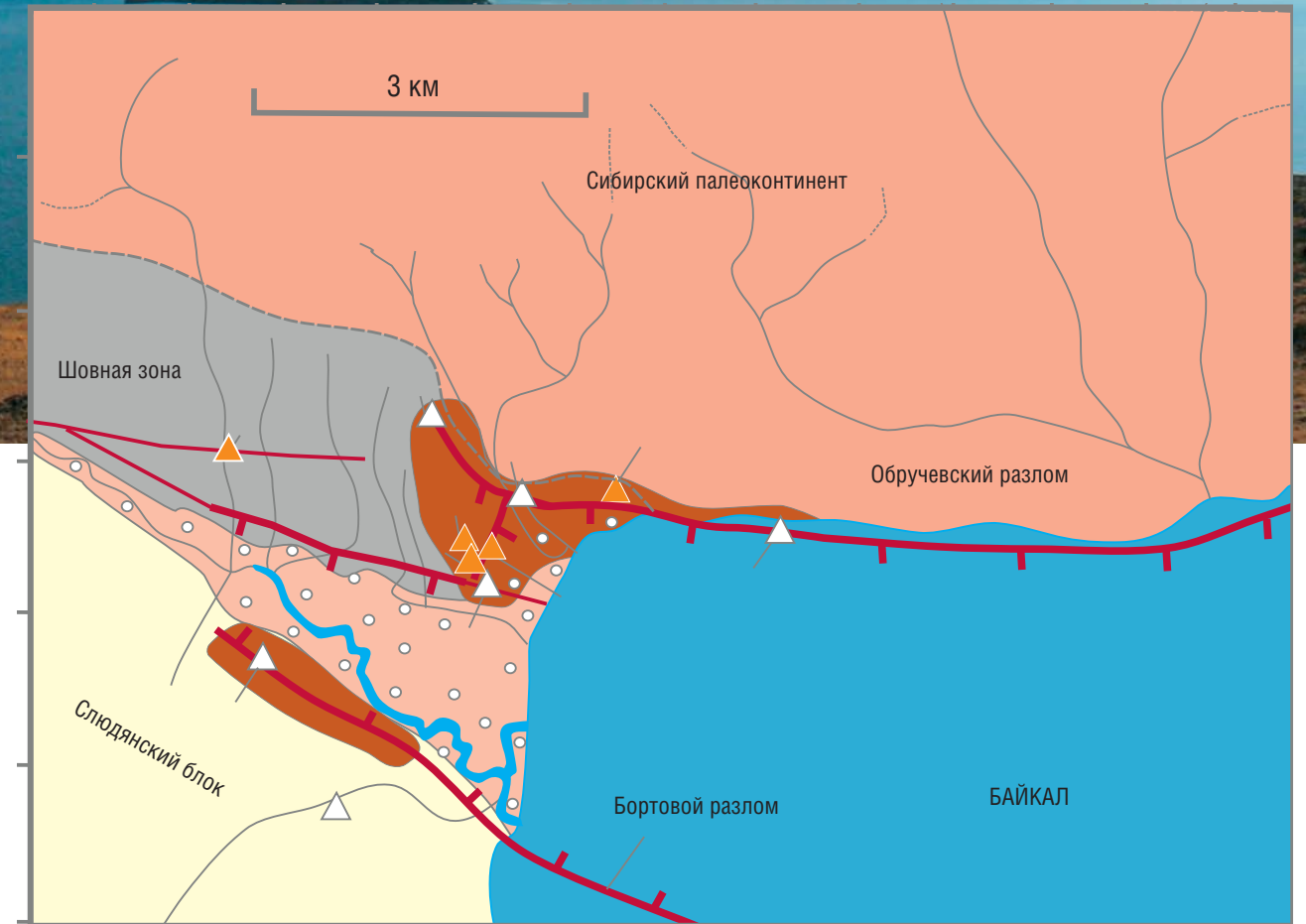
© С. В. Рассказов, 2021

Малое Море Байкала.
© CC BY 2.0/ Michael Ravodin






Обычно сейсмологи только руками разводят: «опять случилось сильное землетрясение», – и описывают его последствия. Предсказания землетрясений редки, но в мировой практике известны. Насчитывается более 600 предвестников сильных землетрясений, но они, как правило, не постоянны. Предвестники могут предупредить об одной надвигающейся катастрофе, но оказаться бесполезными в предупреждении другой. Причинно-следственные связи различных возникающих эффектов при подготовке землетрясений остаются за кадром.

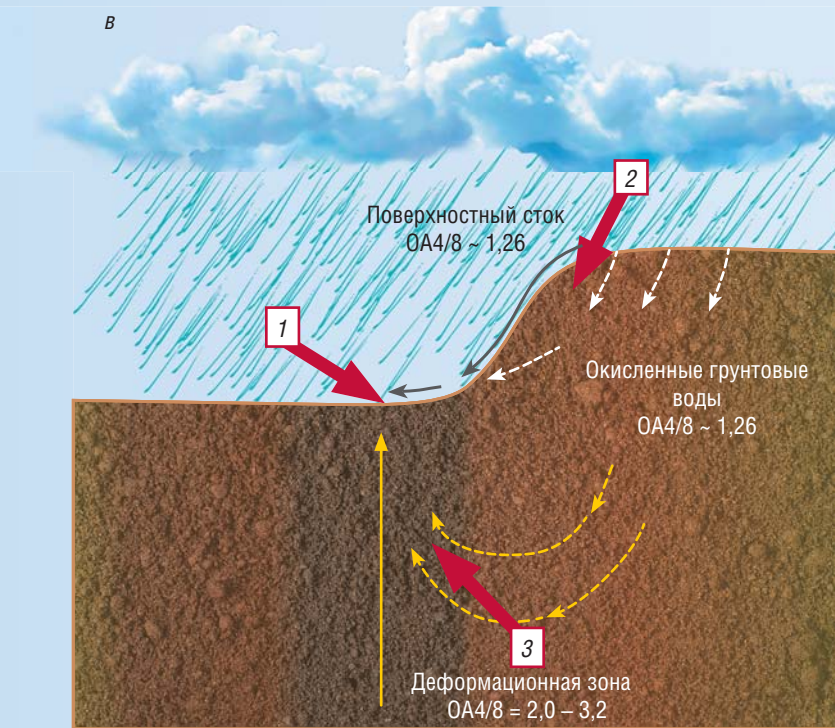
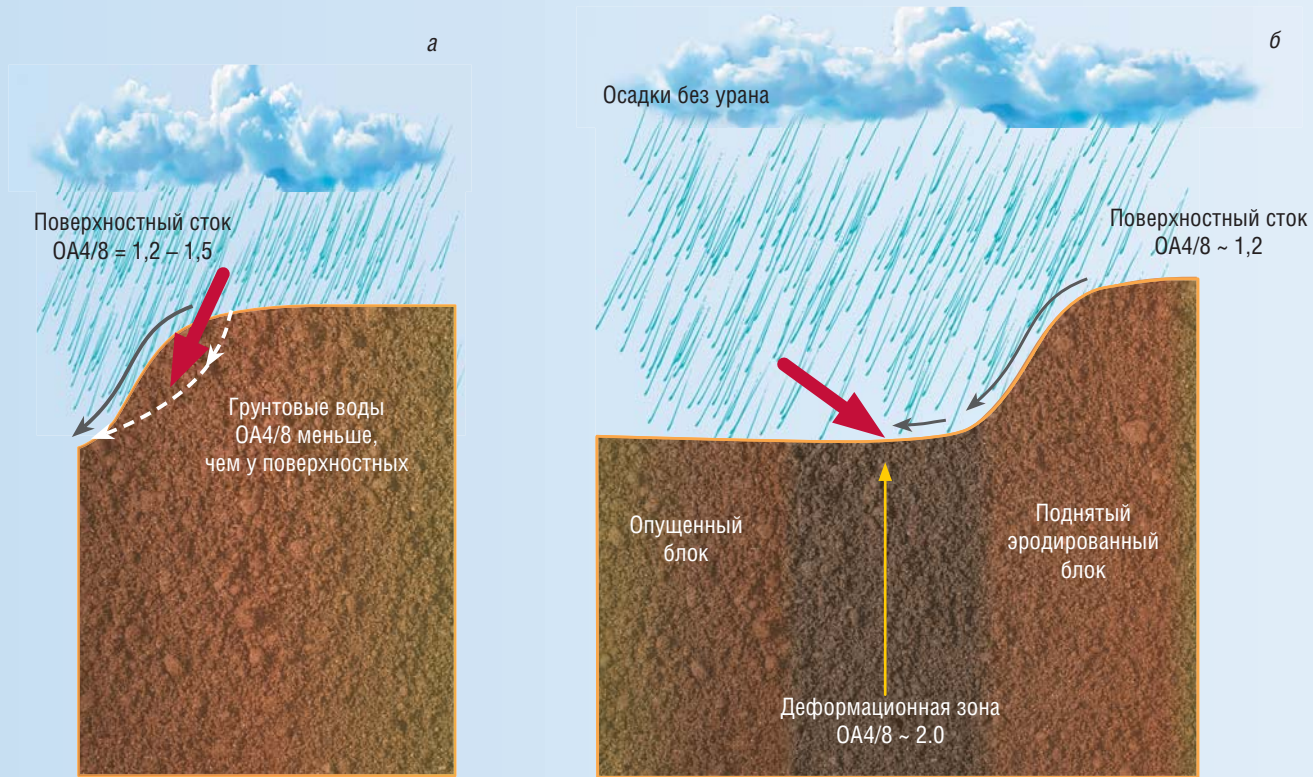
В. В. Чердынцев и П. И. Чалов теоретически обосновали эффект возрастания отношений активностей урана-234 и урана-238 (ОА4/8) в циркулирующих подземных водах в результате сейсмогенных деформаций коры. В 1970-х гг. Чалов организовал мониторинг ОА4/8 (как, впрочем, и других изотопных показателей) в подземных водах Северного Тянь-Шаня, но по иронии судьбы за 1,5 года на территории работ не случилось ни одного землетрясения. Не повезло.

Мы делаем то, что в свое время не удалось Чалову. Для измерения ОА4/8 методом альфа-счета в 1970-х гг. им нужно было сорбировать достаточное для измерений количество урана. При низких содержаниях урана в пресных водах они использовали до 300 л воды, сорбируя уран активированным углем. Сейчас для точных измерений широкого спектра элементов методом ИСП-МС нам требуется всего лишь 2 мл воды, а для измерения



Пункты гидрогеохимического опробования подземных вод расположены на Култукском сейсмопрогностическом полигоне на юго-западной оконечности оз. Байкал. Это место выбрано неслучайно, так как здесь сочленяются крупные сейсмоактивные разломы: Обручевский и Бортовой, ограничивающие Южно-Байкальскую впадину с севера и юга. Здесь же расположена и фрагментарно активизированная главная саянская шовная граница между Сибирским палеоконтинентом и присоединенными к нему геологическими блоками

-  Участок с повышенными значениями изотопного соотношения $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$
-  Суходольная зона аккумуляции осадочных отложений
-  Основная станция мониторинга
-  Вспомогательная станция мониторинга
-  Рельефообразующий разлом



В соотношениях концентраций и изотопного отношения урана в поверхностных и подземных водах на Култукском сейсмопрогностическом полигоне можно выделить три основных тренда, которые зависят от характера водного стока и наличия деформаций в породах, вызванных смещением блоков:

- а – преобладает поверхностный сток; грунтовые (близповерхностные) воды могут примешиваться к поверхностным;
- б – смешение компонентов поверхностного стока и активной деформационной зоны;
- в – смешение компонентов деформационной зоны (1), в том числе совместно с компонентами поверхностного стока (2) и окисленных грунтовых вод (3).

Для мониторинга на Култукском полигоне выбираются станции с наиболее высокими значениями ОА4/8 подземных вод из зон максимальных сейсмогенных деформаций

ОА4/8 (отношение активностей ^{234}U и ^{238}U) ~ 2,0 соответствует глубинной воде оз. Байкал



ОА4/8 выделяем уран из воды полулитровой пластиковой бутылки.

Для организации сейсмопрогностического полигона мы выбрали самую чувствительную (в геологическом отношении) к землетрясениям территорию на западном окончании Южного Байкала в пос. Култук. А перед этим отобрали пробы воды из 43 родников и скважин поселка, чтобы определить и выбрать шесть станций для постоянных наблюдений в разных сейсмически активных разломах. За 8 лет мониторинга мы набрались опыта регистрации откликов концентраций урана и ОА4/8 на подготовку слабых и сильных землетрясений Южного Байкала и к 2020 г. подошли к отслеживанию возможных сейсмических сценариев.

В 2020 г., после 2,5 лет сейсмического затишья на Южном Байкале, в конце марта на Култукском полигоне

Сильным землетрясениям на Южном Байкале в 2020 г. предшествовала слабая сейсмическая активность, «мигрировавшая» в 2015–2017 гг. вдоль линии Голоустное – Мурино. 10 ноября 2017 г. она сменилась сейсмическим затишьем, пока 6 июля 2020 г. на юго-западном окончании этой линии не случилось землетрясение с энергетическим классом $K=12,3$ (максимально возможные значения этого параметра равны 18–20). Позже за этим событием последовали более сильные землетрясения. По данным Байкальского филиала Единой геофизической службы СО РАН (Иркутск)



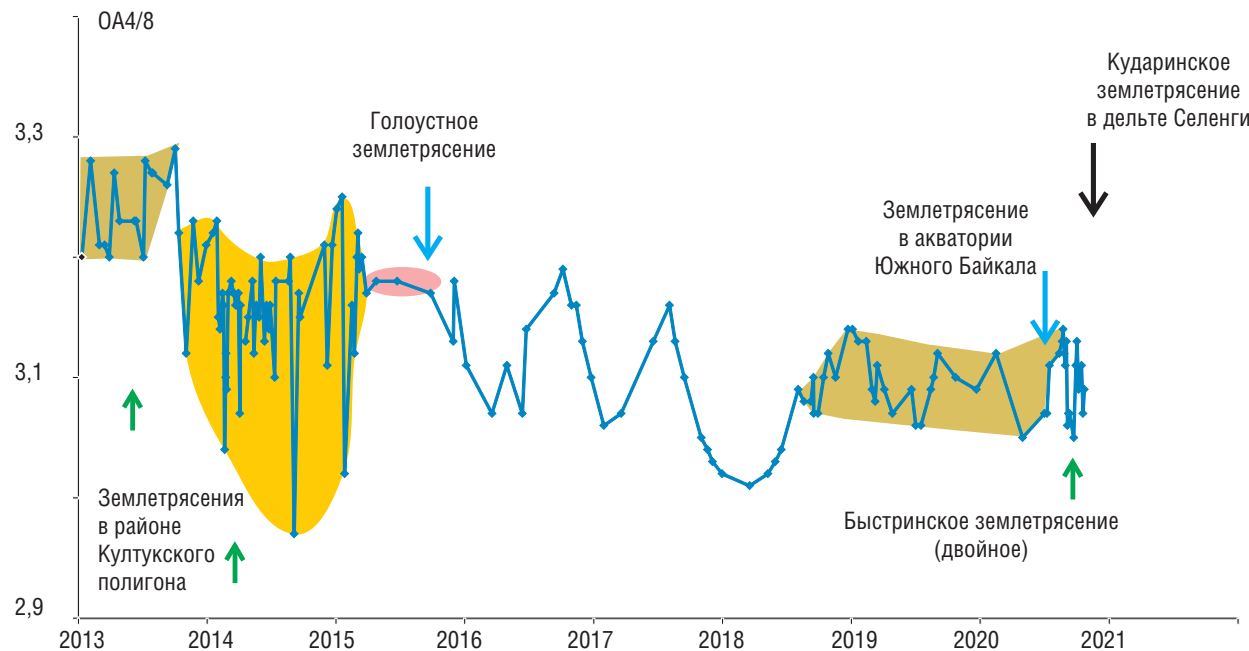
Фото В. Короткоручко

появились первые гидроизотопные признаки деформационной нестабильности. Ощутимый сейсмический толчок произошел в акватории озера только через три месяца – 6 июля, а в ночь с 21 на 22 сентября в районе пос. Быстрое случилось более сильное землетрясение. Наблюдения за деформациями в штольне на полигоне в режиме онлайн выявили последнюю, шестидневную стадию подготовки Быстринского землетрясения. Оно запустило сейсмическую нестабильность во всей Южно-Байкальской впадине и отозвалось новым сильным землетрясением 9 декабря в дельте Селенги, рядом с заливом Провал.

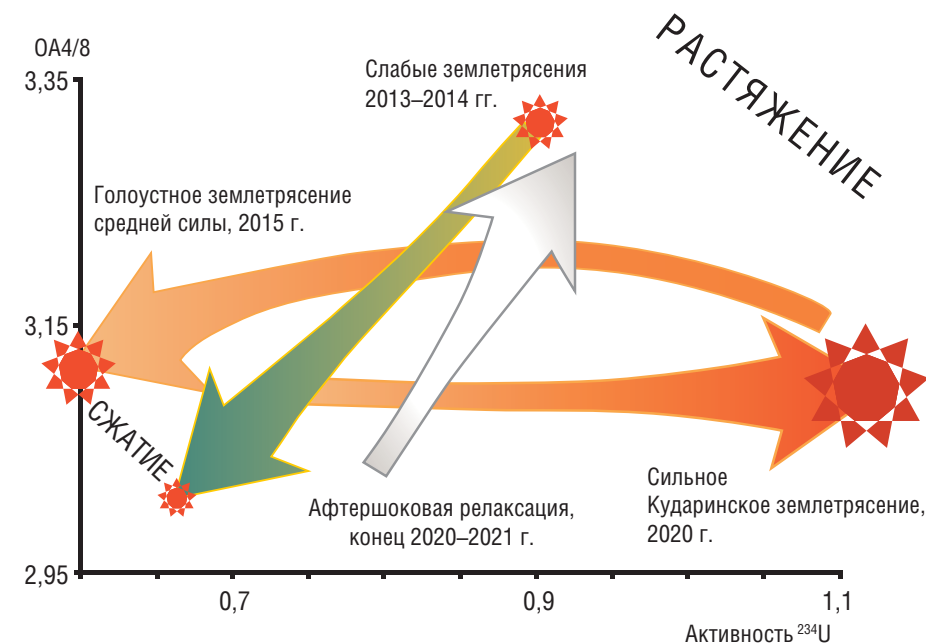
Сейчас прогноз сильных землетрясений на Южном Байкале в среднесрочной (месяцы) и краткосрочной (дни, часы) перспективе становится реальным делом

благодаря усилиям сотрудников Института земной коры СО РАН В. В. Ружича, С. А. Борнякова, К. Ж. Семинского, А. М. Ильясовой и других, а также Е. П. Чебыкина из ЛИИ СО РАН.

В комплексных наблюдениях сейсмогенных деформаций в активных разломах, которые организуются в рамках крупного проекта Минобрнауки России «Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории», важное место занимает мониторинг эффекта Чердынцева – Чалова в подземных водах. Конкретные финальные прогностические выводы зависят от частоты сбора проб на станциях мониторинга и своевременных измерений концентраций урана и ОА4/8 в пробах подземных вод.



Результаты мониторинга отношений активностей ^{234}U и ^{238}U (ОА4/8) на 27-й станции (вверху), а также других станциях Култукского полигона, расположенного на Южном Байкале, свидетельствуют о длительной подготовке сильного Голоустного землетрясения, случившегося там 5 сентября 2015 г. В течение всего предшествующего года в коре импульсно усиливалось сжатие пород с закрытием микротрещин, о чем говорит снижение показателя ОА4/8. Затем наступила фаза растяжения микротрещин, где стали циркулировать подземные воды. Результат – повышение ОА4/8 с выходом на сейсмоопасное плато на 5–8 месяцев, о чем говорят данные разных станций полигона. Быстринское землетрясение, произошедшее западнее полигона 22 сентября 2020 г., не сопровождалось накоплением и разрядкой упругих напряжений в зоне Обручевского разлома. Однако его отклик зафиксирован на 14-й станции в зоне Главного Саянского разлома. Землетрясения, случившиеся на Среднем Байкале в дельте р. Селенги 9 декабря (Кударинское) и 10 декабря 2020 г., имели отклик в виде возрастания активности ^{234}U в подземных водах 27-й станции и появления гидроизотопных эффектов на других станциях



Реконструкция полного сейсмогеодинамического (сжатия и растяжения) цикла Байкальской рифтовой зоны говорит о пульсационном развитии сейсмогенных деформаций как упорядоченного процесса. Сейсмическим стадиям соответствуют тренды последовательного изменения изотопного соотношения $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ (ОА4/8) и активности ^{234}U в подземных водах с выходом на экстремальные значения, соответствующие сильным сейсмическим событиям

Литература

Рассказов С.В., Чебыкин Е.П., Ильясова А.М. и др. Разработка Култукского сейсмопрогностического полигона: вариации ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) и $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в подземных водах из активных разломов западного побережья Байкала // Геодинамика и тектонофизика. 2015. Т. 6. № 4. С. 519–554.

Рассказов С.В., Ильясова А.М., Чувашова И.С. и др. Вариации $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ в подземных водах Мондинского полигона как отклики землетрясений на окончании Тункинской долины в Байкальской рифтовой системе // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 4. С. 1217–1234.

Рассказов С.В., Ильясова А.М., Чувашова И.С. и др. Гидрогеохимическая зональность изотопов урана ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) на юге Сибирского палеоконтинента: роль резервуара Южного Байкала в формировании подземных вод // Геодинамика и тектонофизика. 2020. Т. 11. № 3. С. 632–650.

Семинский К.Ж., Борняков С.А., Добрынина А.А. и др. Быстринское землетрясение в Южном Прибайкалье (21.09.2020 г., $MW = 5.4$): Основные параметры, признаки подготовки и сопровождающие эффекты // Геология и геофизика. 2021. Т. 62. № 5. С. 727–743.

Чебыкин Е.П., Рассказов С.В., Воднева Е.Н. и др. Первые результаты мониторинга $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ в водах из активных разломов западного побережья Южного Байкала // ДАН. 2015. Т. 460. № 4. С. 464–467.

Rasskazov S., Ilyasova A., Bornyakov S. et al. Responses of a $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ activity ratio in groundwater to earthquakes of the South Baikal basin, Siberia // Frontiers Earth Sci. 2020. V. 14. P. 711–737.