ВАРИАЦИИ $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ КАК ПОКАЗАТЕЛЬ ПРОДОЛЬНОЙ СМЕНЫ СТРУКТУРЫ И ПОДГОТОВКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ТУНКИНСКОЙ ДОЛИНЫ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ СИСТЕМЫ

Рассказов С.В.^{1,2}, Борняков С.А.^{1,2}, Чувашова И.С.^{1,2}, Ильясова А.М.¹, Чебыкин Е.П.^{1,3}

¹Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия, E-mail: rassk@crust.irk.ru

²Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

³Лимнологический институт СО РАН, Иркутск, Россия

АННОТАЦИЯ: Обсуждаются результаты 5-летнего мониторинга отношений $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ подземных вод, выполненного с целью изучения подготовки и реализации сильных землетрясений, связанных с эволюцией окончаний Тункинской долины.

1. ВВЕДЕНИЕ

Байкальская рифтовая система состоит из сегментов. В ее центральной и северо-восточной частях сочетаются сегменты трансензионного и раздвигового типа [3]. Юго-западная часть рифтовой системы находится в Центрально-Азиатской орогенной области, образовавшейся в условиях общего сжатия литосферы, на фоне которого проявились сегменты растяжения [5]. В настоящей работе приводятся результаты 5-летнего мониторинга отношений $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ подземных вод (в единицах отношений активностей ОА4/8), выполненного с целью изучения характера подготовки и реализации сильных землетрясений, связанных с эволюцией окончаний Тункинской рифтовой долины, представляющей собой один из рифтовых сегментов Центрально-Азиатской орогенной области.

2. СТРУКТУРА ДОЛИНЫ

Тункинская долина рассматривалась как выражение деформаций в единой новейшей структуре – Байкало-Мондинском разломе [4]. Вдоль долины обособляются малые впадины (Быстринская, Торская, Тункинская, Туранская, Хойтогольская и Мондинская), разделенные структурными перемычками (отрогами). В центральной наиболее крупной из них (30×60 км) Тункинской впадине мощность отложений составляет более 2.4 км. На окончаниях долины размеры и мощность отложений впадин уменьшаются в связи с инверсией тектонических движений в Еловско-Култукской и Ниловско-Мондинской секциях.

Судя по распределению разновозрастных вулканогенно-осадочных толщ в рельефе южного борта долины и междувпадинных перемычек, дифференцированный характер движений проявился вдоль долины в течение всего позднего кайнозоя с максимальным контрастом в

плиоцене и квартере. Инверсионное перерождение структуры секций, однако, было подчинено разным тектоническим процессам. Еловско-Култукская секция сжималась в результате расплющивания литосферного блока Хамар-Дабана у жесткого края кратонного фундамента Сибирской платформы. Ниловско-Мондинская секция была связующим звеном между центральной Тункинской впадиной рифтовой долины и Хубсугульским сегментом субмеридиональных впадин (Хубсугульской, Дархатской, Бусийнгольской – впадин – подвесок, по Н.А. Флоренсову). Эти впадины формировались как радиальные рифты во фронте Хангайского орогена.

3. СЕЙСМИЧНОСТЬ

Восточная Култук-Быстринская часть Тункинской долины была асейсмичной со времени проявления Южно-Байкальского землетрясения 25 февраля 1999 г. ($M_w=6.0$; $K=14.6$). С развитием восточной части долины пространственно связано сильное Култукское землетрясение 27 августа 2008 г. ($M_w=6.3$, $K=15.9$) [2]. Из анализа распределения эпицентров землетрясений Южно-Байкальской впадины следует квазипериодический характер сейсмических активизаций. Сильное Южно-Байкальское землетрясение 1999 года и Култукское землетрясение 2008 года соответствовали сейсмическим интервалам 1994-2003 и 2003-2012 гг. Подготовка следующего сильного землетрясения началась в 2013 г. Предполагается проявление сильного землетрясения в конце 2018 – начале 2019 гг. с наиболее вероятной активизацией центральной части Обручевского разлома в районе его сочленения с Ангарским разломом (район пос. Большие Коты).

Западная Монды-Тумеликская часть Тункинской долины была асейсмичной со времени проявления Мондинского землетрясения 5 ап-

реля 1950 г. ($M_w=6.9$) [1, 2]. В 1994–2017 гг. землетрясения концентрировались вдоль Туран-Ильчирской полосы северо-западного простирания, в которой сейсмическая активность подразделяется на временные интервалы продолжительностью около 7, 4 и 8 лет с асейсмичными перерывами 10 месяцев (в 2002 г.) и 14 месяцев (в 2007–2008 гг.). Внутри сейсмических интервалов временные промежутки между землетрясениями не превышали 6 месяцев. В первом интервале (1994–2002 гг.) не было контрастных землетрясений. События 05.06.1994 ($K=11.0$) и 13.08.1995 ($K=11.1$) произошли на фоне общего равномерного распределения эпицентров. Во втором интервале (2002–2007 гг.) эпицентры землетрясений сосредоточились в Хойтогольской впадине, в которой случилось главное событие 17.09.2003 ($K=13.7$). В третьем интервале (2008–2017 гг.) Туран-Ильчирская полоса обозначилась землетрясением 17.02.2009 ($K=11.4$) и ее последующие землетрясения не превышали $K=11$. Сильное землетрясение ($K=13.9$) в северной части Хубсугульской впадины 15.12.2014 свидетельствовало о включении фактора перестройки сейсмогенирующей структуры.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ГИДРОИЗОТОПНОГО МОНИТОРИНГА

Разный характер сейсмических активизаций восточной и западной частей Тункинской долины отражается в характере вариаций $OA4/8$. Повышение значений этого показателя в водах активного разлома свидетельствует об открытии трещин, способствующем улучшению циркуляции подземных вод (извлечению нуклида ^{234}U из вмещающих трещиноватых пород). И наоборот, снижение $OA4/8$ отражает закрытие трещин, препятствующее циркуляции вод (с уменьшением количества извлеченного нуклида ^{234}U). Для определения подготовки новых сильных землетрясений на восточном и западном окончаниях Тункинской долины наблюдения были сосредоточены на Култукском и Мондинском полигонах.

На Култукском полигоне, расположенном между Култук-Быстринской асейсмичной зоной и Южно-Байкальской сейсмической, гидроизотопный мониторинг начался в середине 2012 г. Было опробовано 43 станции (скважины и родники), 6 из которых использовались для постоянного отбора проб в среднем через 2 недели. Обоснование выбора пунктов опробования и

результаты начального мониторинга приведены в работах [6, 7].

На Мондинском полигоне, расположенном в Монды-Тумеликской асейсмичной зоне и Туран-Ильчирской полосе землетрясений, было опробовано более 35 родников и скважин. В Монды-Тумеликской зоне было определено единственное высокое значение $OA4/8 = 2.49$ в скважине восточной окраины пос. Монды (ст. Mon-D). Другие пробы подземных вод дали значения $OA4/8$, слегка превышающие 1.0. В Туран-Ильчирской полосе землетрясений выделились 2 аномалии: Туранская и Ниловская. Туранская аномалия протянулась субширотно на расстояние 30 км: Шулайский Мус (ст. 97, $OA4/8=2.38$), Мойготы (ст. 129, $OA4/8=1.91$), Туран (ст. 53, $OA4/8=2.20$). Ниловская аномалия отличается от других аномалий Тункинской долины наличием радоновых вод с высокими значениями отношений активностей $^{234}U/^{238}U$: ст. NP-1 ($OA4/8=3.24$), ст. NP-3 ($OA4/8=2.68$), ст. NP-2 ($OA4/8=2.28$) при содержаниях $U=1.74–2.90$ мкг/л. Интересно, что радоновые воды р. Шумак (в 20 км севернее Ниловской аномалии) дали интервал низких отношений $OA4/8$ (1.16–1.26) при подобных сравнительно высоких концентрациях U (3.6–9.9 мкг/л).

Гидроизотопный мониторинг на разных станциях Култукского полигона показал, что при подготовке Голоустенского землетрясения 2015 г. ($K=12.4$), эпицентр которого находился в 140 км от Култукского полигона, и небольших землетрясений непосредственно на Култукском полигоне во всех случаях сначала наблюдалось закрытие трещин, а затем их открытие с наполнением водой, сопровождавшееся переходом от крупноамплитудных вариаций $OA4/8$ к малоамплитудным, которые обозначали интервал сейсмоопасного состояния разлома.

Мониторинг ст. Mon-D начался 1 февраля 2013 г. Концентрации урана снижались от 1.2 мкг/л до 0.3 мкг/л с резким падением до 0.1 мкг/л в августе 2015 г. Уменьшение концентраций урана сопровождалось снижением изотопных отношений урана от 2.49 до 1.58. Пока изотопные отношения урана оставались относительно высокими (более 2.3), наблюдались отклики на удаленные сейсмические события в виде синхронного возрастания концентрации урана и изотопного отношения. После снижения этих показателей подобные отклики прекратились.

Особое значение имел гидроизотопный отклик на сильное Северо-Хубсугульское земле-

трясение 5 декабря 2014 г. ($K = 13,9$). В интервале 01.02.2013–19.06.2014 значения $OA4/8$ были повышенными (2.32–2.49) при повышенном содержании U (0.84–1.23 мкг/л). При подготовке и реализации этого землетрясения в интервале 06.10.2014–09.12.2014 значения $OA4/8$ снизились до промежуточного интервала (1.88–2.05) при промежуточном содержании U (0.52–0.66 мкг/л). Начиная с 07.03.2015 установился интервал низких значений $OA4/8$ (1.58–1.73) при низкой концентрации U (0.03–0.67 мкг/л).

Ступенчатое снижение значений изотопных отношений и концентраций урана, связанное с сильным землетрясением, свидетельствует о перестройке сейсмогенерирующей структуры в Мондинско-Тумеликской асейсмичной зоне с последовательным снижением роли глубинных вод активного разлома с повышением роли грунтовых и поверхностных вод. О разбавлении глубинных вод активного Мондинского разлома малоглубинными грунтовыми водами свидетельствуют синхронные изменения концентраций разных элементов в мониторинговых пробах.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы приходим к выводу о разном характере реализации сейсмических процессов на окончаниях Тункинской долины. В отличие от станций Култукского полигона, в которых упругие сейсмогенерирующие напряжения реализовались в закрытии, а затем – открытии трещин, способствовавших циркуляции глубинных вод в активном Обручевском разломе, на Мондинском полигоне имели место сейсмогенные деформации, в ходе которых трещины активного Мондинского разлома последовательно закрывались, препятствуя проникновению в него глубинных вод.

Отбор проб и аналитические работы по подземным водам были выполнены в рамках государственного проекта Института земной коры №

0346-2016-0005 при финансовой поддержке обработки и анализа сейсмических данных по Иркутской научной интеграционной программе Сибирского отделения Российской академии наук «Фундаментальные исследования и прорывные технологии как основа для развития Байкальского региона и его межрегиональных связей» и в рамках работ Китайско-Российского научно-исследовательского центра Удаляньчи–Байкал по новейшему вулканизму и окружающей среде, грант № P162011012.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голенецкий С.И. Сейсмичность района Тункинских впадин на юго-западном фланге Байкальского рифта в свете инструментальных наблюдений второй половины XX века // Геология и геофизика. – 1998. – Т. 39, № 2. – С. 260–270.
2. Карта эпицентров последних десяти землетрясений. Иркутск: Байкальский Филиал Геофизической Службы, 2017. <http://www.seis-bykl.ru/index.php?ma=1>
3. Логачев Н.А., Рассказов С.В., Иванов А.В., Леви К.Г., Бухаров А.А., Кашик С.А., Шерман С.И. Кайнозойский рифтогенез в континентальной литосфере // Литосфера Центральной Азии. Ред. Н.А. Логачев. – Новосибирск: Наука, 1996. – С. 57–80.
4. Парфеев А.В., Саньков В.А. Напряженное состояние земной коры и геодинамика юго-западной части Байкальской рифтовой системы. – Новосибирск: Академическое Изд-во «Гео», 2006. – 151 с.
5. Рассказов С.В., Логачев Н.А., Иванов А.В. Корреляция позднекайнозойских тектонических и магматических событий Байкальской рифтовой системы с событиями на юго-востоке Евразийской плиты // Геотектоника. – 1998. – № 4. – С. 25–40.
6. Рассказов С.В., Чебыкин Е.П., Ильясова А.М., Воднева Е.Н., Чувашова И.С., Борняков С.А., Семинский А.К., Снопков С.В., Чечельницкий В.В., Гилева Н.А. Разработка Култукского сейсмопрогностического полигона: вариации ($^{234}U/^{238}U$) и $^{87}Sr/^{86}Sr$ в подземных водах из активных разломов западного побережья Байкала // Геодинамика и тектонофизика. – 2015. Т. 66 № 4. – С. 519–554. DOI:10.5800/GT-2015-6-4-0192
7. Чебыкин Е.П., Рассказов С.В., Воднева Е.Н., Ильясова А.М., Чувашова И.С., Борняков С.А., Семинский А.К., Снопков С.В. Первые результаты мониторинга $^{234}U/^{238}U$ в водах из активных разломов западного побережья Южного Байкала // Доклады академии наук. – 2015. – Т. 460, № 4. – С. 464–467.

VARIATIONS OF A $^{234}U/^{238}U$ IN GROUNDWATER AS AN INDICATOR ON LENGTHWISE CHANGE OF STRUCTURE AND EARTHQUAKE PREPARATION IN THE TUNKA VALLEY OF THE BAIKAL RIFT SYSTEM

Rasskazov S.V.^{1,2}, Bornyakov S.A.^{1,2}, Chuvashova I.S.^{1,2}, Il'yasova A.M.¹, Chebykin E.P.^{1,3}

¹Institute of the Earth's Crust, SB RAS, Irkutsk, Russia, E-mail: rasskaz@crust.irk.ru

²Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

³Limnological Institute SB RAS, Irkutsk, Russia

ABSTRACT: Results of a 5-year $^{234}U/^{238}U$ monitoring in groundwater for study of preparation and implementation of large earthquakes related to the evolution of the Tunka Valley terminations are discussed.