

<https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-4-0392>

## THE $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ VARIATIONS IN GROUNDWATER FROM THE MONDY AREA IN RESPONSE TO EARTHQUAKES AT THE TERMINATION OF THE TUNKA VALLEY IN THE BAIKAL RIFT SYSTEM

S. V. Rasskazov<sup>1,2</sup>, A. M. Ilyasova<sup>1</sup>, I. S. Chuvashova<sup>1,2</sup>, E. P. Chebykin<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS, Irkutsk, Russia

<sup>2</sup> Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

<sup>3</sup> Limnological Institute, Siberian Branch of RAS, Irkutsk, Russia

**Abstract:** High  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  activity ratio ( $AR_{4/8}$ ), identified in groundwater from the Elovka-Kultuk and Nilovka-Mondy inversion sections of the Tunka Valley, coincide with areas of earthquake concentrations. In order to substantiate an approach to earthquake prediction, spatial variations of this parameter were determined in natural water at the western termination of the valley and its temporal variations were monitored in water from the Mon-D well in the Mondy basin in 2013–2017. A recorded gradual decrease of  $AR_{4/8}$  values in water of this well, coeval with preparation and implementation of an earthquake with the energy class  $K=13.9$  in the north of lake Khövsgöl, reflected crack closure that prevented deep water penetration in the Tumelik-Mondy aseismic zone. At the eastern termination of the valley, near the Kultuk village, decreasing  $AR_{4/8}$  values in groundwater were followed with their sharp increasing and transition to low-amplitude variations. Accordingly, crack closing was followed with their opening that facilitated the circulation of deep water and provided seismic events. Leveling of the Mondy anomaly in the Tumelik-Mondy aseismic zone, accompanied by a continuous activity of the Turan and Nilovka anomalies within the Nilovka-Mondy section, emphasized a specific role of the latter as an intermediate chain between the Khövsgöl segment of radial rifts, originated in front of the Hangay orogen, and the largest central basin of the Tunka Valley. The Kultuk, Zaktuy, and North-Tory  $AR_{4/8}$  and earthquake anomalies denoted boundaries of the Elovka-Kultuk section in the Khamardaban lithospheric block flattened at the edge of the Siberian platform basement.

**Key words:** Baikal, active faults, earthquake prediction, groundwater,  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$

### RESEARCH ARTICLE

Received: April 9, 2018

Revised: September 7, 2018

Accepted: September 21, 2018

**For citation:** Rasskazov S.V., Ilyasova A.M., Chuvashova I.S., Chebykin E.P., 2018. The  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  variations in groundwater from the Mondy area in response to earthquakes at the termination of the Tunka Valley in the Baikal Rift System. *Geodynamics & Tectonophysics* 9 (4), 1217–1234. doi:10.5800/GT-2018-9-4-0392.

**Для цитирования:** Рассказов С.В., Ильясова А.М., Чувашова И.С., Чебыкин Е.П. 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. doi:10.5800/GT-2018-9-4-0392.

# ВАРИАЦИИ $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ МОНДИНСКОГО ПОЛИГОНА КАК ОТКЛИКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ОКОНЧАНИИ ТУНКИНСКОЙ ДОЛИНЫ В БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ СИСТЕМЕ

С. В. Рассказов<sup>1,2</sup>, А. М. Ильясова<sup>1</sup>, И. С. Чувашова<sup>1,2</sup>, Е. П. Чебыкин<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

<sup>3</sup> Лимнологический институт СО РАН, Иркутск, Россия

**Аннотация:** Высокие отношения активностей  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  ( $OA4/8$ ), выявленные в подземных водах Еловско-Култукской и Ниловско-Мондинской инверсионных секций окончаний Тункинской долины, совпадают с участками концентрации землетрясений. Для обоснования подхода к прогнозу землетрясений на западном окончании долины были определены пространственные вариации этого параметра в природных водах и его временные вариации в 2013–2017 гг. в водах скважины Мон-Д в Мондинской впадине. Задокументированное ступенчатое снижение значений  $OA4/8$  в воде этой скважины, одновременно с подготовкой и реализацией землетрясения с энергетическим классом  $K=13.9$  на севере оз. Хубсугул, отразило последовательное закрытие трещин, препятствовавшее проникновению глубинных вод в Тумелик-Мондинской асейсмичной зоне. В подземных водах ее восточного окончания, в районе пос. Култук, снижение значений  $OA4/8$  сменялось их резким возрастанием и переходом к малоамплитудным вариациям. Соответственно закрытие трещин сменялось открытием, способствовавшим циркуляции глубинных вод и реализации землетрясений. Нивелирование Мондинской аномалии Тумелик-Мондинской асейсмичной зоны с продолжением активности Туранской и Ниловской аномалий внутренней части Ниловско-Мондинской секции подчеркнуло ее особую роль как связующего звена между Хубсугульским сегментом радиальных рифтов, образовавшихся во фронте Хангайского орогена, и наиболее крупной центральной впадиной Тункинской долины. Проявление Култукской, Зактуйской и Северо-Торской аномалий  $OA4/8$  и землетрясений по периферии Еловско-Култукской секции обозначило границы Хамардабанского литосферного блока, расплющенного у края фундамента Сибирской платформы.

**Ключевые слова:** Байкал; активный разлом; прогноз землетрясений; подземные воды;  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Сегменты трансензионного и раздвигового типа центральной и северо-восточной части Байкальской рифтовой системы сменяются в ее юго-западной части сегментами растяжения, развивавшимися на фоне общего сжатия литосферы Центрально-Азиатской орогенной системы [Logachev et al., 1996; Rasskazov et al., 1998]. Между Южно-Байкальской и Хубсугульской впадинами рифтовой системы находится сегмент Тункинской долины, современная эволюция которой выражается в подготовке и реализации сильных землетрясений ( $M=6-7$ ), зарегистрированных инструментально и представленных в палеосейсмодислокациях [Treskov, Florensov, 1952; Misharina, 1967; Solonenko, 1975; Logachev, 1993; Golenetskii, 1998; Sherman et al., 2012].

Для прогноза сильных сейсмических толчков изучения только сейсмичности и палеосейсмодислокаций недостаточно. Необходимы дополнительные наблюдения предвестников, которые могут свидетельствовать о характере пространственно-

временного распределения деформаций и обеспечивать регистрацию изменений текущего состояния сейсмоопасных участков активных разломов. Прямой деформационный мониторинг требует специального оборудования станций [Bornyakov et al., 2017]. Более широкие возможности оценки текущих деформаций непосредственно в активных разломах дает изучение пространственно-временных вариаций гидроизотопных параметров [Seminsky et al., 2014; Semenov et al., 2018]. Состояние активного разлома может определяться также мониторингом  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  в подземных водах. Если химически разделенные изотопы урана измеряются с точки зрения их скоростей альфа-излучения, радиоактивное равновесие между  $^{238}\text{U}$  и  $^{234}\text{U}$  представляет собой равное отношение альфа-активности  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}=1.0$  ( $OA4/8=1.0$ ). Циклическое равновесие между изотопами  $^{234}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$  соответствует их атомному соотношению  $5.47 \times 10^{-5}$ . Возрастание  $OA4/8$  связывается с деформационным воздействием на породу, получившим название эффекта Чердынцева-Чалова [Cherdyntsev, 1969]. В подземных водах разных рай-

онов Центральной Азии и США сильные землетрясения сопровождалось заметным возрастанием или снижением значений  $OA4/8$  [Zverev et al., 1975; Finkel, 1981; Chalov et al., 1980].

При изучении вариаций  $OA4/8$  в подземных водах активных разломов Тункинской долины предполагалось, что повышение значений этого параметра отражает открытие трещин, способствующее улучшению циркуляции подземных вод (извлечению нуклида  $^{234}U$  из вмещающих пород), а снижение  $OA4/8$  – закрытие трещин, препятствующее циркуляции вод (извлечению нуклида  $^{234}U$ ). Для определения участков повышенной и затрудненной проницаемости подземных вод проводилось общее опробование скважин, родников, минеральных и термальных источников. Затем состояние активных разломов оценивалось постоянным опробованием выбранных станций. Гидроизотопный мониторинг был сосредоточен на Култукском и Мондинском полигонах окончаний Тункинской долины. На Култукском полигоне ее восточного окончания было опробовано 43 станции (скважины и родники), шесть из которых были выбраны для постоянного отбора проб, проводившегося в среднем через две недели. Был определен колебательный характер временных вариаций  $OA4/8$  с меняющимися во времени длительностью и амплитудами колебаний, и выявлена синхронизация вариаций  $OA4/8$  на станциях, сопровождавшаяся слабыми сейсмическими событиями ( $K=9-10$ ) в районе полигона. Методика аналитических исследований и первые результаты мониторинга вод на Култукском полигоне приведены в статьях [Chebykin et al., 2007, 2015; Rasskazov et al., 2015]. В настоящей работе охарактеризованы вариации  $OA4/8$  в природных водах на Мондинском полигоне западного окончания долины с 5-летним мониторингом этого отношения в водах скважины Мон-D.

## 2. СТРОЕНИЕ ДОЛИНЫ

Строение долины охарактеризовано в работах [Florensov, 1960, 1973; Logachev, 1974]. Ее образуют малые впадины (Быстринская, Торская, Тункинская, Туранская, Хойтогольская и Мондинская), разделенные структурными перемычками (отрогами). По результатам изучения тектонической трещиноватости и механизмов очагов землетрясений предполагалось формирование долины вдоль единого Байкало-Мондинского разлома в общем сдвиговом поле напряжений при СЗ-ЮВ положении оси растяжения и СВ-ЮЗ положении оси сжатия [Sherman, Levi, 1977; Ryazanov, 1978; Parfeevets, Sankov, 2006; Sherman et al., 2012].

В наиболее крупной Тункинской впадине (30×60 км), занимающей центральное положение,

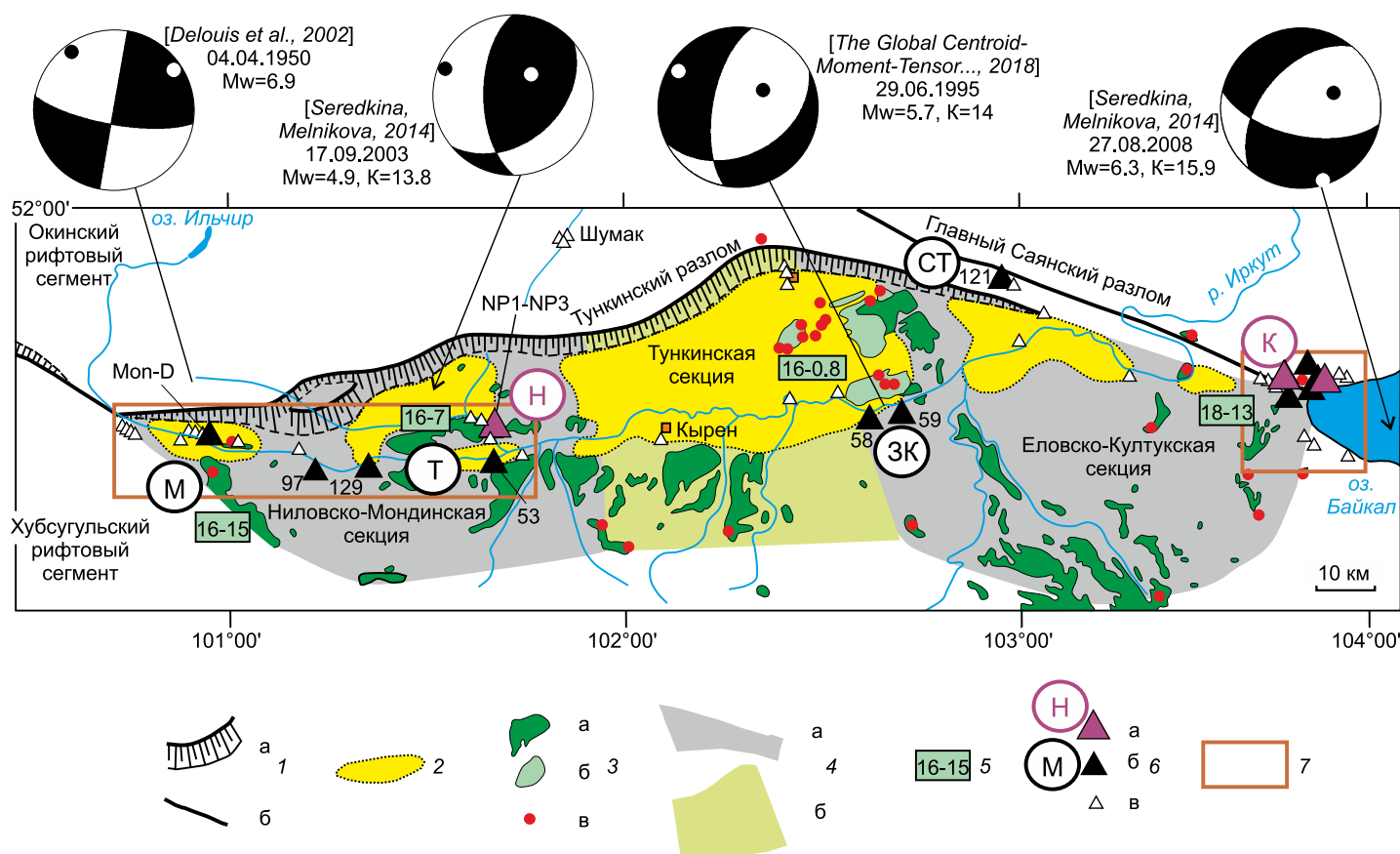
мощность отложений составляет более 2.4 км [Zorin, 1971]. В основании разреза южной части Тункинской впадины, в районе пос. Жемчуг, километровой скважиной были вскрыты олигоценые отложения [Kashik, Mazilov, 1994]. Основное наполнение впадины составляют более молодые миоцено-нижнеплиоценовые отложения угленосной танхойской свиты и красноцветные верхнеплиоценовые – эоплейстоценовые отложения ановоской свиты, перекрытые неоплейстоценовыми песками. На окончаниях долины размеры и мощность отложений впадин уменьшаются в связи с инверсией тектонических движений в Еловско-Култукской и Ниловско-Мондинской секциях (рис. 1). В обеих инверсионных секциях долины отложения танхойской и ановоской свит подняты и фрагментарно обнажены.

Датирование вулканических пород в вершинном поясе гор и на междувпадинных перемычках показало разное время начала поднятия и эрозионного расчленения восточного и западного окончания долины [Rasskazov, 1993]. Ее общее горячее растяжение имело место около 16–15 млн лет назад с последующим встречным стягиванием горячих процессов от ее восточного и западного окончания к центру Тункинской впадины при угасании сначала (около 7 млн лет назад) в восточной части Ниловско-Мондинской инверсионной секции, а затем (около 0.8 млн лет назад) – в западной части Еловско-Култукской. Судя по распределению разновозрастных вулканогенно-осадочных толщ в рельефе южного борта долины и междувпадинных перемычек, дифференцированный характер движений проявлялся вдоль нее в течение всего позднего кайнозоя с максимальным контрастом в плиоцене и квартере.

## 3. АНОМАЛИИ $OA4/8$

Для подземных вод Тункинской впадины высокие значения этого параметра (от 2.0 до 3.7) не характерны и определены в Еловско-Култукской и Ниловско-Мондинской инверсионных секциях. В первой из них выделяются Култукская, Северо-Торская и Зактуйская аномалии  $OA4/8$ , расположенные по периферии этой секции, во второй – внутренние аномалии – Ниловская, Туранская и Мондинская. Для изучения Култукской аномалии создан одноименный сейсмопрогностический полигон [Chebykin et al., 2015; Rasskazov et al., 2015], а для изучения Ниловской, Туранской и Мондинской аномалий – Мондинский полигон (рис. 1).

Култукская аномалия находится в зоне перехода от Еловско-Култукской инверсионной секции к Южно-Байкальской впадине. Максимальный эф-



**Рис. 1.** Основные структурные элементы Тункинской долины и местоположение гидроизотопных станций наблюдений.

1 – главные разломы: а – рельефообразующий, принятый в качестве наиболее сейсмоопасного в рифтовой долине [Solonenko, 1975], б – шов между кристаллическим фундаментом Сибирской платформы и аккретивными террейнами; 2 – рифтовая впадина; 3 – вулканические породы: а – миоценовые лавы, б – плиоцен-четвертичные лавы, в – вулканы и некки; 4 – структурные секции рифтовой долины: а – прогрессирующего погружения и осадконакопления впадин, б – погружения и инверсионного поднятия; 5 – время вулканизма, млн лет назад; 6 – станции опробования подземных вод (номера станций): а – со значениями  $OA4/8$  более 3.0 (аномалии: Н – Ниловская, К – Култукская), б – в интервале от 2.0 до 3.0 (аномалии: М – Мондинская, Т – Туранская, ЗК – Зактуйская, СТ – Северо-Торская), в – фоновыми значениями  $OA4/8$  от 1 до 2; 7 – Мондинский и Култукский полигоны. Механизмы сильных землетрясений показаны по данным [Delouis et al., 2002; The Global Centroid-Moment-Tensor..., 2018; Seredkina, Melnikova, 2014].

**Fig. 1.** The main structural elements of the Tunka valley and the locations of hydroisotope observation stations.

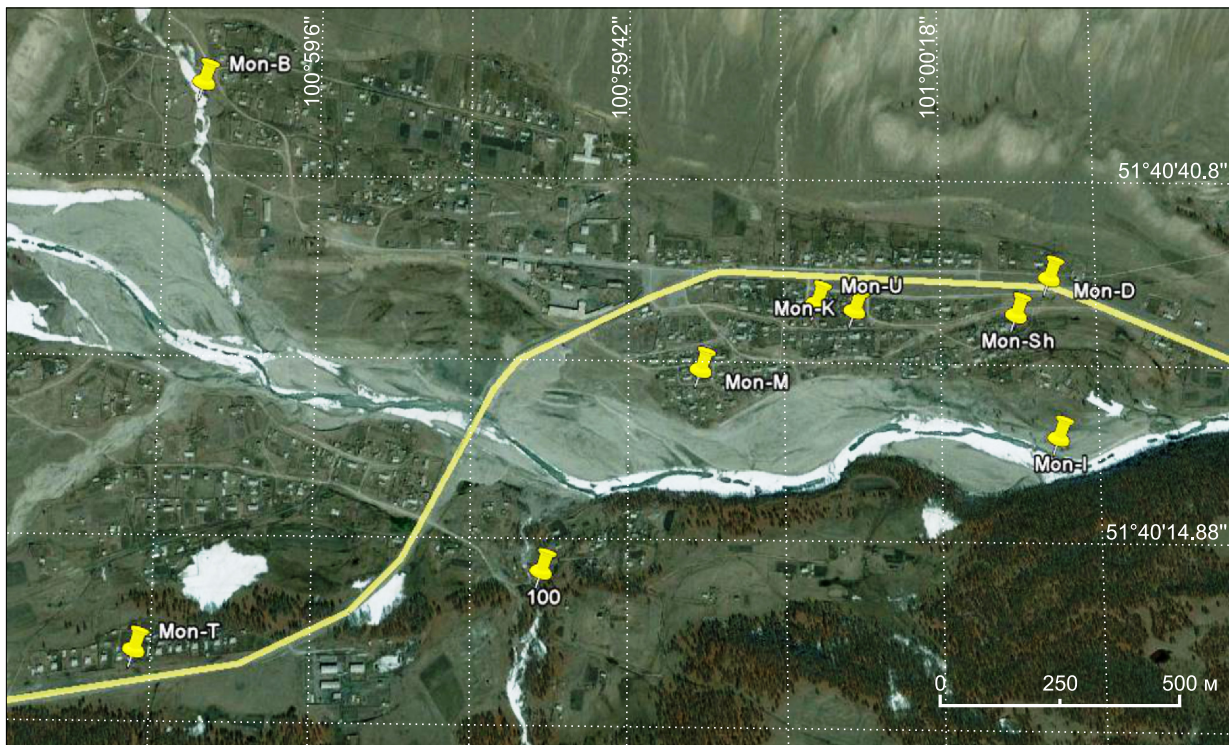
1 – main faults: а – relief-forming fault accepted as the most seismically hazardous one in the rift valley [Solonenko, 1975], б – suture between the crystalline basement of the Siberian platform and the accreted terrains; 2 – rift depression; 3 – volcanic rocks: а – Miocene lava, б – Pliocene-Quaternary lava, в – volcanoes and nekkis; 4 – structural sections of the rift valley: а – progressive subsidence and sedimentation in depressions, б – subsidence and inversion uplifting; 5 – time of volcanism, Ma; 6 – groundwater sampling stations (station numbers) with the  $OA4/8$  values: а – above 3.0 (anomalies: Н – Nilova Pustyn, К – Kultuk), б – from 2.0 to 3.0 (anomalies: М – Mondy, Т – Turan, ЗК – Zaktui, СТ – North Tor), and в – background  $OA4/8$  from 1.0 to 2.0; 7 – Mondy and Kultuk polygons. The mechanisms of strong earthquakes after [Delouis et al., 2002; The Global Centroid-Moment-Tensor..., 2018; Seredkina, Melnikova, 2014].

фект раскрытия трещин проявился здесь в тектонитах Главного Саянского разлома (ст. 27, скважина школы № 7. пос. Култук, максимальное значение  $OA4/8=3.29$ ) и в кратонном кристаллическом фундаменте, рассеянном Обручевским разломом (ст. 143, родник КБЖД,  $OA4/8=3.67$ ).

Северо-Торская аномалия расположена в сочленении Тункинского и Главного Саянского разломов. В ней определено значение  $OA4/8=2.15$  (род-

ник ст. 121) при низкой концентрации урана (0.054 мкг/л). Измерение пробы воды из другого родника этой же территории (ст. 122) также дало повышенное значение  $OA4/8$  (1.93) при содержании урана на порядок выше (0.43 мкг/л).

Зактуйская аномалия пространственно соответствует сочленению Еловской междувпадинной перемычки с южным бортом Тункинской долины. В роднике ст. 59 получено значение  $OA4/8=2.11$  и в



**Рис. 2.** Схема отбора проб в с. Монды.

**Fig. 2.** Schematic map of sampling locations in the village of Mondy.

20-метровой скважине ст. 58 – значения 2.92 и 2.86 (серии измерений 25 и 47).

В Мондинской аномалии высокое значение  $OA4/8=2.49$  определено в единственной скважине, расположенной на восточной окраине с. Монды (ст. Mon-D) (рис. 2, табл. 1). Другие станции опробования подземных и поверхностных вод Мондинской впадины и территории западнее ее дали значения  $OA4/8$ , не превышающие 1.5.

Туранская аномалия протянулась субширотно вдоль Туранского разлома 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 представлена выходами термальных радоновых и холодных пресных вод в Ниловой Пустыни с высокими значениями  $OA4/8$  ст. NP-1 (3.24), ст. NP-3 (2.68) и ст. NP-2 (2.28) при содержаниях  $U=1.74-2.90$  мкг/л. Интересно, что радоновые воды р. Шумак (в 20 км севернее Ниловской аномалии) дают интервал низких отношений  $OA4/8$  (1.16–1.26) при более высокой концентрации  $U$  (3.6–9.9 мкг/л).

#### 4. СЕЙСМИЧНОСТЬ

Распределение эпицентров землетрясений в инверсионных секциях Тункинской долины в це-

лом согласуется с распределением аномалий  $OA4/8$ .

Култук-Быстринская часть Тункинской долины была асейсмичной со времени проявления Южно-Байкальского землетрясения 25 февраля 1999 г. ( $M_w=6.0$ ;  $K=14.6$ ). Позже (27 августа 2008 г.) в акватории оз. Байкал вблизи пос. Култук произошло сильное Култукское землетрясение ( $M_w=6.3$ ,  $K=15.9$ ) с механизмом сбросо-сдвигового типа [Mel'nikova et al., 2012; Map..., 2017]. Сейсмические события акватории Южного Байкала находят отклики в вариациях  $OA4/8$  подземных вод Култукского полигона [Rasskazov et al., 2018]. Зактуйской аномалии  $OA4/8$  пространственно соответствует эпицентр землетрясения 29.06.1995 ( $M_w=5.7$ ;  $K=14$ ), для которого был определен механизм сбросо-сдвигового типа [The Global Centroid-Moment-Tensor..., 2018]. Северо-Торской аномалии  $OA4/8$  пространственно соответствует рой землетрясений 1976–1993 гг. [Golenetskii, 1998].

Подобное согласование в распределении аномалий  $OA4/8$  и эпицентров землетрясений наблюдается в Ниловско-Мондинской инверсионной секции. Ее сейсмогенерирующая структура перестраивалась во времени. В 1962–1979 гг. эпицентры землетрясений концентрировались вдоль субширотных Хойтогольской и Туранской впадин [Golenetsky, 1990], а позже, в 1976–1993 гг., обособились в

Т а б л и ц а 1. Результаты измерений концентраций U и OА4/8 в подземных и поверхностных водах Мондинского полигона

Table 1. Measured concentrations of uranium and OА4/8 in the groundwater and surface waters of the Mondy polygon

Шифр станции	Объект	Дата отбора	Координаты	U, мкг/л	OА4/8, в скобках – отн. ошибка, %
С. Монды и окрестности					
Мон-D	Скважина (17 м)	01.02.2013	101.008; 51.676	1.20	<b>2.49</b> (0.86)
K	Скважина (13 м)	01.02.2013	101.002; 51.675	1.20	1.48 (0.73)
Sh	Скважина (3 м)	01.02.2013	101.007; 51.675	1.20	1.47 (0.75)
T	Скважина (28 м)	02.02.2013	100.980; 51.668	<b>2.80</b>	1.20 (0.84)
B	Скважина (23 м)	02.02.2013	100.982; 51.679	0.36	1.32 (0.79)
U	Скважина (18 м)	03.02.2013	101.001; 51.675	1.50	1.44 (0.77)
M	Скважина (8 м)	03.02.2013	100.997; 51.674	1.50	1.42 (0.78)
I	Прорубь р. Иркут	25.01.2014	101.008; 51.672	1.60	1.50 (0.81)
100	Р. Горхонка	01.06.2014	100.992; 51.670	0.42	1.40 (1.10)
99	Р. Хулугайша	31.05.2014	101.048; 51.673	1.57	1.38 (0.90)
98	Безымянный приток р. Иркут	31.05.2014	101.192; 51.670	<b>3.10</b>	1.25 (0.98)
К востоку от с. Монды					
54	Ниловский отрог, скважина (75 м)	08.07.2013	101.674; 51.660	<b>2.20</b>	1.42 (1.10)
NP-1	Горячая вода, курорт Нилова Пустынь	17.01.2014	101.679; 51.692	0.81	<b>2.20</b> (0.72)
NP-2	Серебряный источник	17.01.2014	101.676; 51.694	<b>2.40</b>	<b>3.21</b> (0.56)
NP-3	Родник в долине р. Ехэ-Ухгунь	17.01.2014	101.677; 51.693	1.70	<b>2.68</b> (0.62)
NP-4	Р. Ехэ-Ухгунь	17.01.2014	101.666; 51.701	1.30	1.40 (0.84)
53	С. Туран, скважина (10 м)	17.01.2014	101.684; 51.637	0.73	1.83 (0.81)
55	Глазной источник	17.01.2014	101.688; 51.637	<b>3.50</b>	1.82 (0.72)
97	Шулайский Мус	31.05.2014	101.290; 51.636	0.80	<b>2.38</b> (0.66)
129	Родник Мойготы	19.08.2014	101.420; 51.646	1.63	1.91 (0.62)
К западу от с. Монды					
Vug	Приток р. Иркут	02.08.2014	100.691; 51.759	<b>2.90</b>	1.03 (1.00)
124	Приток р. Иркут	18.08.2014	100.761; 51.837	<b>2.00</b>	1.31 (0.75)
125	Родник	18.08.2014	100.706; 51.784	0.30	1.15 (0.98)
126	Приток р. Иркут	18.08.2014	100.709; 51.768	1.50	1.25 (0.80)
127	Приток р. Иркут	18.08.2014	100.742; 51.741	1.06	1.29 (0.77)
128	Приток р. Иркут	18.08.2014	100.779; 51.724	1.85	1.26 (0.79)

Примечание. Жирным шрифтом выделены повышенные значения OА4/8 и концентраций U.

Note. Increased OА4/8 and U concentrations are given in bold letters.

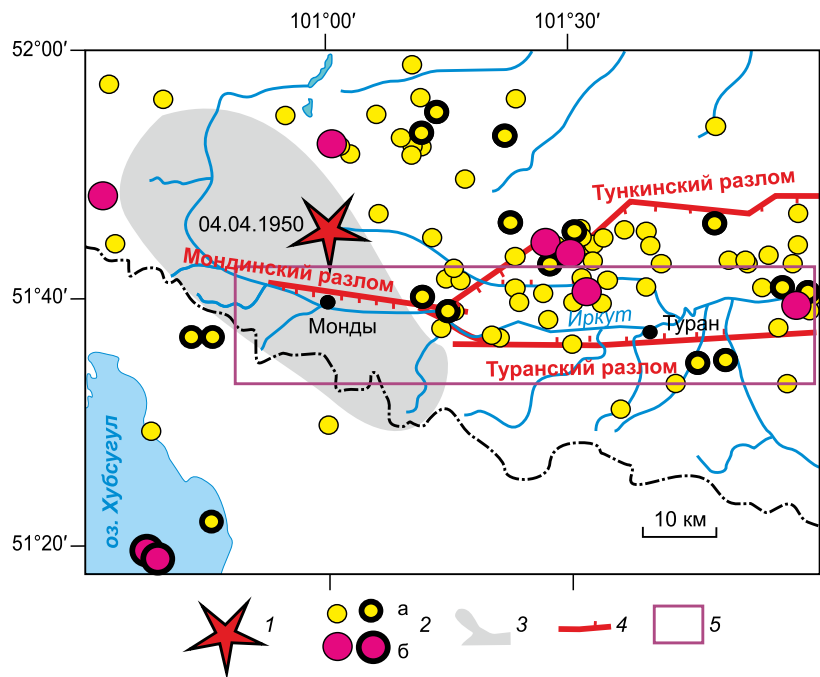
Туран-Ильчирскую полосу северо-западного простираения [Golenetskii, 1998]. При общем анализе пространственно-временного распределения эпицентров, зафиксированных инструментально на западном окончании Тункинской долины, обозначилась Тумелик-Мондинская полоса сейсмического затишья, субпараллельная Туран-Ильчирской полосе землетрясений (рис. 3).

Эпицентр Мондинского землетрясения 4 апреля 1950 г. располагался на границе сейсмической и асейсмичной зон. Мондинский полигон перекрывает Тумелик-Мондинскую асейсмичную зону и Туран-Ильчирскую полосу землетрясений (рис. 3). Для этого землетрясения первоначально был определен взбросовый механизм [Misharina, 1967], принятый в работах [Solonenko, 1975; Misharina et al., 1983; Logachev, 1993; Solonenko et al., 1993]. Затем механизм, интерпретированный как сдвиговый [Doser, 1991], был принят в качестве более досто-

верного [Golenetskii, 1998; Parfeevets, Sankov, 2006; Mel'nikova et al., 2012]. Уточненный сдвиговый механизм воспроизведен в работе [Seredkina, Melnikova, 2014].

На рис. 1 обращает на себя внимание зеркальное отображение секторов сжатия и растяжения полусферы Хойтогольского землетрясения 2003 г. относительно секторов сжатия и растяжения полусферы Зактуйского землетрясения 1995 г. Правосторонний сдвиг по субширотному мондинскому фрагменту Тункинского разлома землетрясения 1950 г. был воспроизведен в подобном сдвиговом механизме Хойготского землетрясения с проявлением вертикальной компоненты смещения. В механизмах Зактуйского и Култукского землетрясений проявились левосторонние сбросо-сдвиговые смещения.

Сейсмичность временного интервала 1994–2016 гг. разделена на временные интервалы 1994–



**Рис. 3.** Туран-Ильчирская полоса эпицентров землетрясений и Тумелик-Мондинская полоса сейсмического затишья.

1 – эпицентр Мондинского землетрясения 1950 г.; 2 – эпицентры других землетрясений (данные инструментальных наблюдений 1994–2016 гг. [Map..., 2017]): а –  $K < 11$ , б –  $K \geq 11$  (жирными линиями выделены события, зарегистрированные во время мониторинга станции Мон-D); 3 – Тумелик-Мондинская зона сейсмического затишья; 4 – линии главных разломов; 5 – Мондинский полигон исследований ОА4/8 подземных вод.

**Fig. 3.** Turan-Ilichir band of earthquake epicenters and the Tumelik-Mondy zone of seismic quiescence.

1 – epicenter of the 1950 Mondy earthquake; 2 – epicenters of other earthquakes (instrumental observation data of 1994–2016 [Map..., 2017]): а –  $K < 11$ , б –  $K \geq 11$  (seismic events recorded during monitoring at the Mon-D station are marked by thick lines); 3 – Tumelik-Mondy zone of seismic quiescence; 4 – main faults; 5 – Mondy polygon for observation of the ОА4/8 values of groundwater.

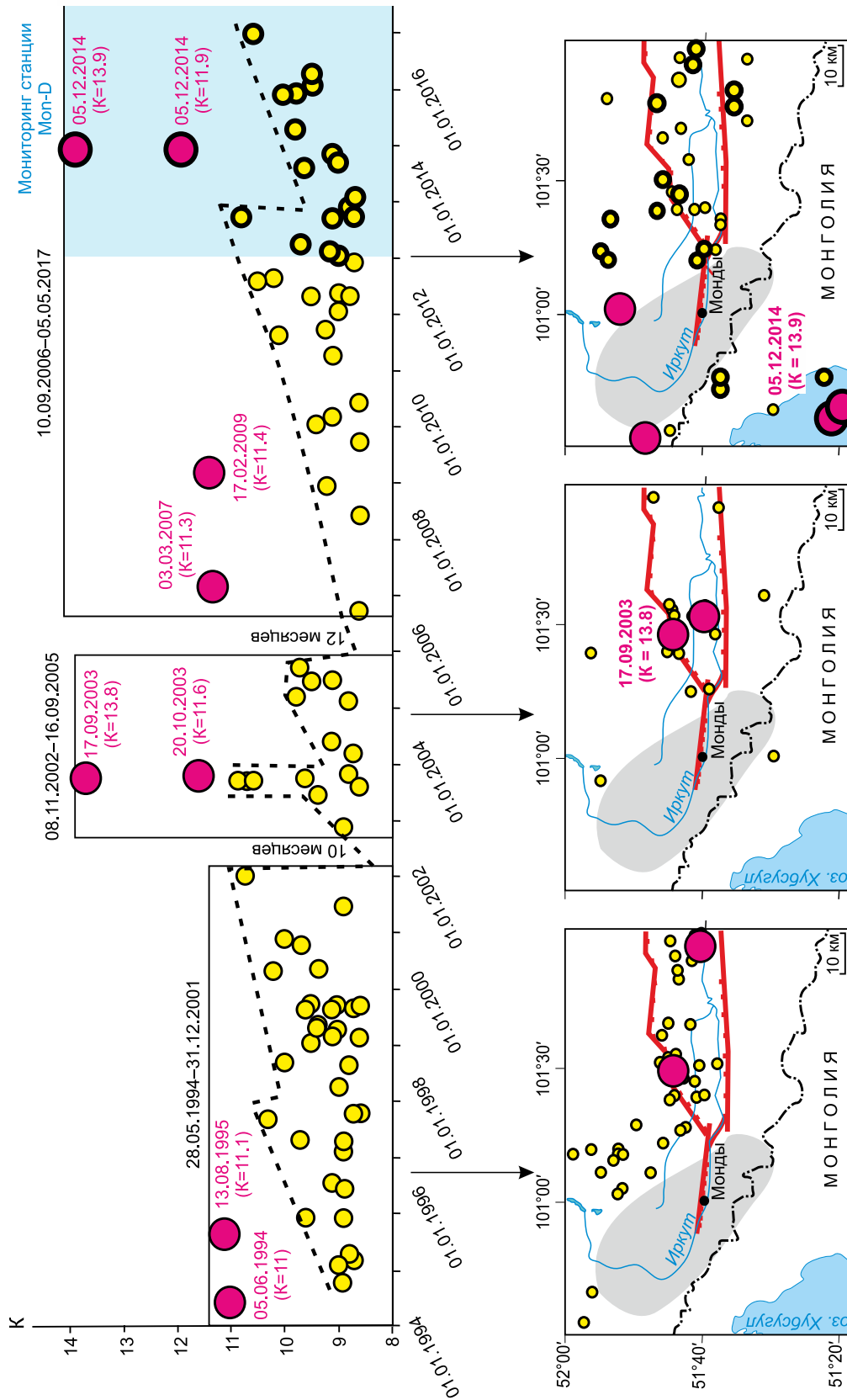
2001 гг. (продолжительность около 7 лет), 2002–2005 гг. (продолжительность около 3 лет) и 2006–2016 гг. (продолжительность около 10 лет) с асейсмичными перерывами между ними 10 месяцев (2002 г.) и 12 месяцев (2005–2006 гг.) (рис. 4). В первом интервале землетрясения 05.06.1994 г. ( $K=11.0$ ) и 13.08.1995 г. ( $K=11.1$ ) произошли на фоне землетрясений  $K \sim 9.0$  с последующим повышением класса фоновых сейсмических событий к концу интервала при общем равномерном распределении эпицентров в пределах Туран-Ильчирской полосы. Все эпицентры находились северо-восточнее Тумелик-Мондинской асейсмичной зоны. Во втором интервале эпицентры концентрировались в Хойтогольской впадине с главным событием 17.09.2003 г. ( $M_w=4.9$ ,  $K=13.8$ ) [Melnikova et al., 2009]. Эпицентр одного из периферических событий оказался южнее Тумелик-Мондинской асейсмичной зоны.

В начале третьего интервала на фоне редких землетрясений с  $K < 9.0$  событиями 03.03.2007 г. ( $K=11.3$ ) и 17.02.2009 г. ( $K=11.4$ ) обозначилась северо-западная часть Туран-Ильчирской полосы. К концу 2014 г. энергетический класс фоновых сей-

смических событий повысился до  $K=10.6$ . Во время мониторинговых наблюдений 2013–2017 гг. образовалась хубсугульская ветвь эпицентров со двоятым сейсмическим эффектом ( $K=13.9$ ) в северной части Хубсугульской впадины 15.12.2014 г. Перед этими событиями энергетический класс фоновых землетрясений понизился до 9.0 с последующим возрастанием до 10.0. Сейсмогенерирующая структура перестраивалась при реализации сильных событий, в то время как фоновые землетрясения в основном отражали продолжавшуюся активность юго-восточной части Туран-Ильчирской зоны.

## 5. РЕЗУЛЬТАТЫ ГИДРОИЗОТОПНОГО МОНИТОРИНГА

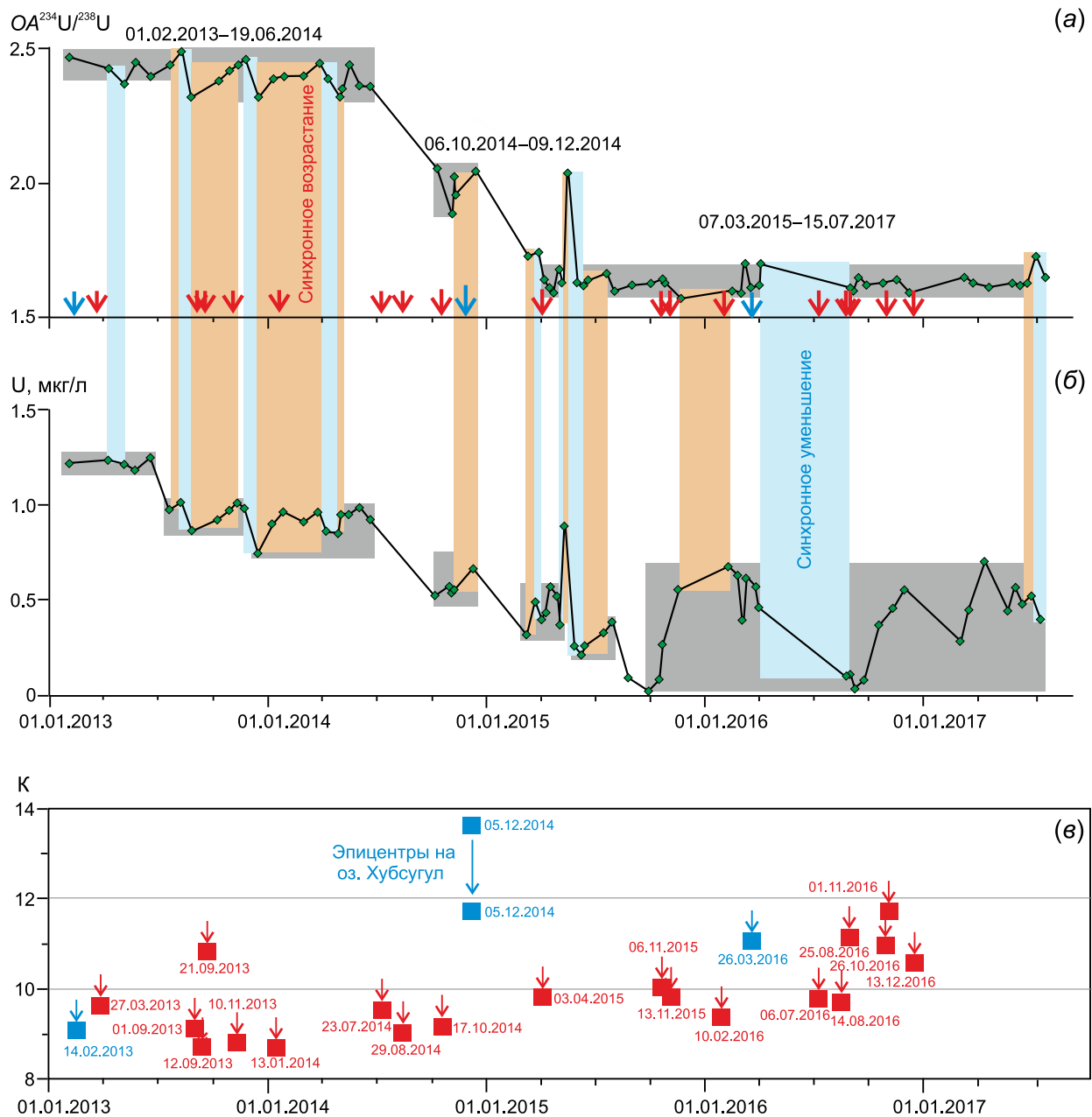
Мониторинг ст. Мон-D начался 1 февраля 2013 г. при концентрации  $U=1.20$  мкг/л и значении  $ОА4/8=2.47$ . С течением времени произошло существенное снижение и концентраций  $U$  (до 0.3 мкг/л), и значений  $ОА4/8$  (до 1.58) (рис. 5, табл. 2). Пока изотопные отношения урана оставались относительно высокими (более 2.3), наблюдались



**Рис. 4.** Пространственно-временное распределение эпицентров землетрясений трех интервалов сейсмических активизаций в 1994–2017 гг. Условные обозначения см. на рис. 3.

**Fig. 4.** Space-time pattern of the earthquake epicenters that took place in three intervals of seismic activation in 1994–2017. See the legend in Fig. 3.





**Рис. 5.** Временные вариации отношения активности изотопов урана (а), концентрации  $U$  (б) в подземных водах станции Мон-D и энергетических классов сейсмических событий в районе западного окончания Тункинской долины (в). На панелях (а) и (б) серым цветом обозначены ступени последовательного снижения изотопного и элементного параметров подземных вод. На панелях (а) и (в) синим цветом выделены события на территории Монголии, красным – на территории России. Ошибка определения  $OA^{234}U/^{238}U$  сопоставима с размером символа пробы на панели (а).

**Fig. 5.** Time variations of the ratio of uranium isotope activity (а), uranium concentrations (б) in the groundwater of the Mon-D station, and the energy classes of seismic events in the western termination of the Tunka valley (в). Grey colour in panels (а) and (б) – stages of successive decrease in isotopic and element parameters of the groundwater. In panels (а) and (в), blue symbols – seismic events in Mongolia, red symbols – seismic events in Russia. The  $OA^{234}U/^{238}U$  estimation error is reflected in the size of the sample's symbol in panel (а).

отклики на удаленные сейсмические события в виде синхронного возрастания концентрации урана и изотопного отношения. После снижения этих показателей землетрясения в основном не совпадали с такими синхронными изменениями.

В начальном интервале мониторинга станции Mon-D 01.02.2013–19.06.2014 значения  $OA^{234}U/^{238}U$  были повышенными (2.32–2.49) при повышенном содержании  $U$  (0.84–1.23  $\mu\text{g/l}$ ). При подготовке и реализации сильного Северо-Хубсугульского зем-

Т а б л и ц а 2. Результаты мониторинга концентраций и изотопного отношения урана в водах скважины Мон-Д

Table 2. Monitored concentrations and isotope ratios of uranium in the water from the Mon-D well

№ п/п	Дата отбора	U, мкг/л	ОА4/8 (1 $\sigma$ )	№ п/п	Дата отбора	U, мкг/л	ОА4/8 (1 $\sigma$ )
1	01.02.2013	1.20	2.47 (0.58)	30	24.03.2015	0.49	1.73 (0.56)
2	08.04.2013	1.22	2.43 (0.61)	31	03.04.2015	0.40	1.63 (0.80)
3	05.05.2013	1.20	2.37 (0.60)	32	11.04.2015	0.43	1.60 (0.78)
4	23.05.2013	1.17	2.45 (0.56)	33	18.04.2015	0.57	1.58 (0.76)
5	16.06.2013	1.23	2.40 (0.72)	34	28.04.2015	0.52	1.67 (0.85)
6	18.07.2013	0.96	2.44 (0.85)	35	03.05.2015	0.37	1.62 (0.80)
7	07.08.2013	1.00	2.49 (0.86)	36	11.05.2015	0.88	2.03 (0.72)
8	24.08.2013	0.86	2.32 (0.81)	37	27.05.2015	0.27	1.62 (0.79)
9	09.10.2013	0.91	2.38 (0.74)	38	08.06.2015	0.22	1.61 (0.80)
10	27.10.2013	0.96	2.42 (0.64)	39	14.06.2015	0.27	1.63 (0.78)
11	10.11.2013	1.00	2.44 (0.60)	40	15.07.2015	0.33	1.65 (0.73)
12	22.11.2013	0.97	2.46 (0.63)	41	29.07.2015	0.39	1.59 (0.74)
13	13.12.2013	0.74	2.32 (0.68)	42	26.08.2015	0.10	1.61 (0.88)
14	07.01.2014	0.89	2.39 (0.66)	43	28.09.2015	0.03	1.62 (2.30)
15	25.01.2014	0.95	2.40 (0.68)	44	16.10.2015	0.10	1.63 (0.93)
16	27.02.2014	0.90	2.40 (0.66)	45	21.10.2015	0.27	1.62 (0.94)
17	25.03.2014	0.95	2.45 (0.66)	46	09.02.2016	0.67	1.59 (0.91)
18	08.04.2014	0.85	2.39 (0.65)	47	24.02.2016	0.63	1.58 (0.90)
19	27.04.2014	0.84	2.32 (0.70)	48	02.03.2016	0.40	1.69 (0.89)
20	01.05.2014	0.94	2.35 (0.73)	49	10.03.2016	0.61	1.60 (0.95)
21	14.05.2014	0.94	2.44 (0.65)	50	25.03.2016	0.57	1.61 (0.92)
22	01.06.2014	0.97	2.36 (0.74)	51	29.03.2016	0.46	1.69 (0.85)
23	19.06.2014	0.91	2.36 (0.69)	52	24.08.2016	0.10	1.60 (1.10)
24	06.10.2014	0.52	2.05 (0.69)	53	29.08.2016	0.11	1.59 (1.10)
25	31.10.2014	0.56	1.88 (0.62)	54	06.09.2016	0.04	1.64 (1.80)
26	04.11.2014	0.54	2.02 (0.62)	55	21.09.2016	0.08	1.61 (1.20)
27	05.11.2014	0.55	1.95 (0.61)	56	17.10.2016	0.37	1.62 (1.00)
28	09.12.2014	0.66	2.04 (0.69)	57	10.11.2016	0.46	1.63 (0.98)
29	07.03.2015	0.32	1.72 (0.81)	58	30.11.2016	0.55	1.58 (0.99)

летрясения 5 декабря 2014 г. ( $K=13.9$ ) наблюдалось уменьшение значений элементного и изотопного параметров. В интервале 06.10.2014 г. – 09.12.2014 г. значения  $OA4/8$  снизились до промежуточного интервала (1.88–2.05) и промежуточного содержания U (0.52–0.66 мкг/л). Позже установился интервал более низких значений  $OA4/8$  (1.58–1.73) при низкой концентрации U (0.03–0.67 мкг/л).

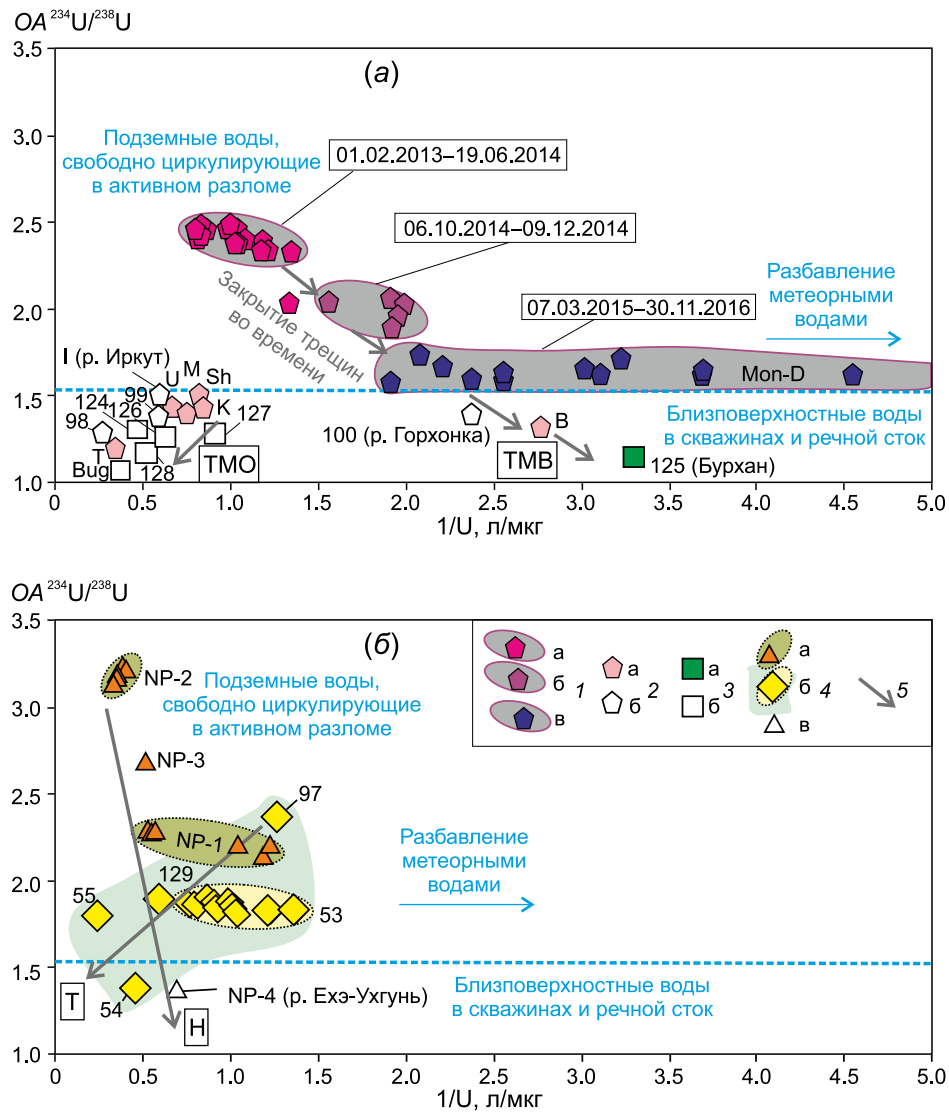
## 6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

### 6.1. Типизация источников урана подземных вод по соотношениям $OA4/8 - 1/U$

На диаграмме фигуративные точки вод, обогащенных ураном, который приближается к циклическому изотопному равновесию, смещаются к началу координат  $OA^{234}\text{U}/^{238}\text{U}=1$  и  $1/U \rightarrow 0$  (рис. 6). Такой уран переходит в природные воды из зоны окисления, не нарушенной новообразованными трещинами, и переносится ими в окисленных условиях в виде уранил-иона. В зонах новообразованной трещиноватости активных разломов суще-

ствуют восстановительные условия, не способствующие обогащению ураном циркулирующих вод.

В Тумелик-Мондинской зоне сейсмического затихья сильно неравновесный изотопный состав урана был зарегистрирован в водах единственной станции Мон-Д, расположенной на восточной окраине с. Монды. В начальный период наблюдений, с 1 февраля 2013 г. до середины 2014 г., на ней фиксировались значения  $OA4/8$  в интервале 2.32–2.49 при интервале концентрации U=0.84–1.23 мкг/л. В пробах, отобранных с 6 октября до 9 декабря 2014 г., значения обоих параметров были ниже ( $OA4/8=1.88-2.05$ ; U=0.52–0.66). В конце этого интервала (05.12.2014 г.) произошло Северо-Хубсугульское землетрясение ( $K=13.9$ ). В дальнейшем (2015–2017 гг.) изотопный и элементный параметры еще снизились ( $OA4/8=1.58-1.73$ ; U=0.03–0.67, одно значение 0.88) (табл. 2, рис. 6, а). Тренд ступенчатого снижения изотопного и элементного параметров урана (повышения значений  $1/U$ ) отразил переход к сейсмоопасному состоянию территории с закрытием трещин, повлекшим за собой затруднение циркуляции подземных вод, одновременно с повышением роли фактора восстанов-



**Рис. 6.** Соотношение  $1/U - OA4/8$  в поверхностных и подземных водах в Тумелик-Мондинской зоне сейсмического затишья (а) и Туран-Ильчирской сейсмической зоне (б).

1–3 – асейсмичная зона: 1 – станция Мон-D (а–в – временная смена источника), 2 – другие станции Мондинской впадины (а – вода родника или скважины, б – речная вода), 3 – станции, расположенные восточнее Мондинской впадины (а – вода родника, б – речная вода); 4 – сейсмическая зона: станции, расположенные западнее Мондинской впадины (а – Нилова Пустынь, б – Туранский разлом, в – речные воды); 5 – тренд снижения значений  $OA4/8$ . В Тумелик-Мондинской зоне выделяется восстановительный тренд с понижением концентрации U (с возрастанием  $1/U$ ) (ТМВ) и окислительный тренд при повышенных концентрациях U (при низких значениях  $1/U$ ) (ТМО). Ниловский тренд (Н) отличается от тренда ТМВ более крутым наклоном. Туранский тренд (Т) может рассматриваться как окислительный.

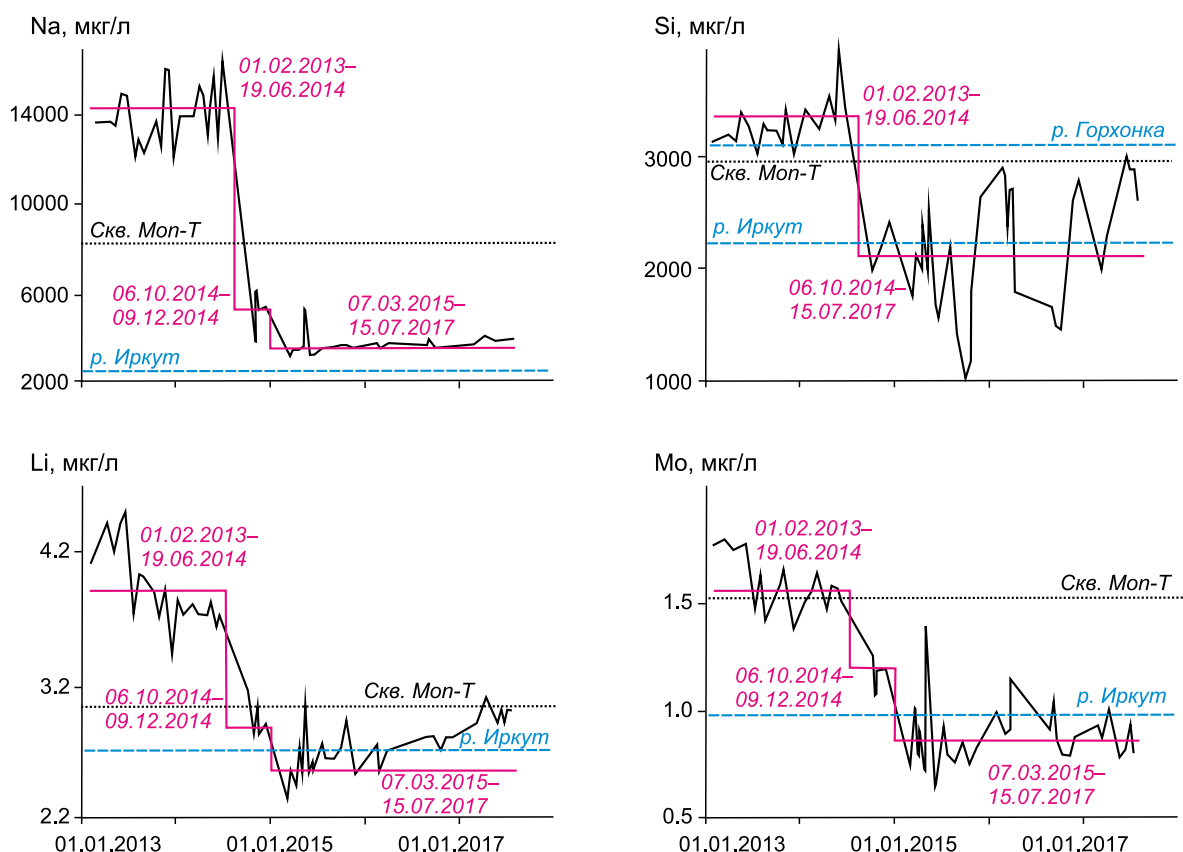
**Fig. 6.** Ratio  $1/U - OA4/8$  in the surface waters and groundwaters in the Tumelik-Mondy zone of seismic quiescence (a) and the Turan-Ilchir seismic zone (b).

1–3 – aseismic zone: 1 – Mon-D station (a–v – time change of the source), 2 – other stations in the Mondy depression (a – spring/well water, б – river water), 3 – stations located east of the Mondy depression (a – spring water, б – river water); 4 – seismic zone: stations located west of the Mondy depression (a – Nilova Pustyn, б – Turan fault, в – river water); 5 – trend of decreasing  $OA4/8$  values. In the Tumelik-Mondy zone, there is a recovery trend with decreasing concentrations of U ( $1/U$  increase) (TMB) and an oxidative trend with increased concentrations of U (low  $1/U$  values) (TMO). The Nilova Pustyn trend (H) is steeper and thus differs from the TMB trend. The Turan trend (T) can be considered as oxidative.

ленности среды в остаточном циркулирующем объеме.

Тренд станции Мон-D продолжается в нижнюю правую часть диаграммы (см. рис. 6, а) фигуратив-

ными точками близповерхностных и речных вод, формировавшихся в таких же восстановительных условиях Тумелик-Мондинской зоны (тренд ТМВ). Крайнее значение  $OA4/8=1.15$  при минимальной



**Рис. 7.** Временные вариации содержаний Na, Si, Li и Mo в пробах вод станции Мон-Д в сопоставлении с концентрациями этих элементов в речных водах. Тренды распределения обозначены линиями малинового цвета, уровни концентраций речных вод – линиями синего цвета.

**Fig. 7.** Temporal variations in the contents of Na, Si, Li and Mo in the water samples from the Mon-D station in comparison with the concentrations of these elements in the river waters. Bright pink lines – distribution trends; blue lines – concentrations.

концентрации U ( $0.3 \text{ мкг/л}$ ) получено для пробы воды, сочившейся из скалы на берегу р. Белый Иркут (ст. 125, Бурхан). Близкий состав урана определен в пробе воды из скважины, пройденной на юго-западной окраине пос. Монды (ст. В):  $OA4/8=1.32$  и  $U=0.36 \text{ мкг/л}$ . В поверхностном стоке в эту группу входит вода р. Горхонка (станция 100).

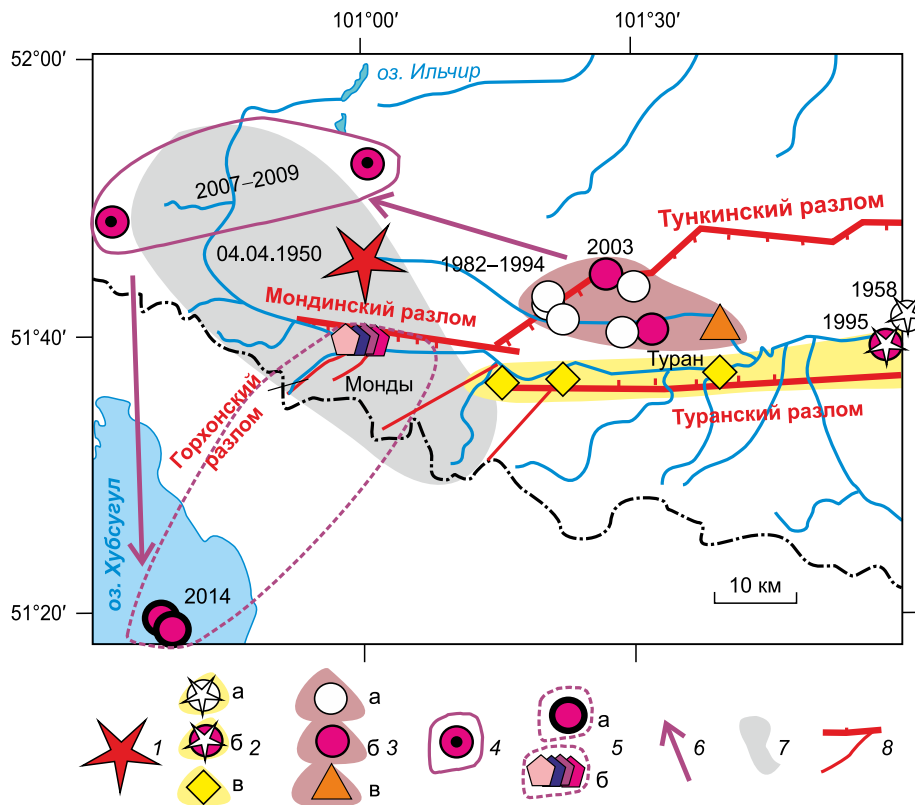
В остальных пробах поверхностных и подземных вод Тумелик-Мондинской зоны с низкими значениями  $OA4/8$  ( $<1.5$ ) и  $1/U$  ( $<1.0$ ) преобладает уран из зоны окисления (тренд ТМО). К примеру, проба ст. Bug (р. Буговек) показала  $OA4/8=1.03 \pm 0.01$  (ошибка измерения  $1\sigma$ ) при максимальной концентрации U ( $2.9 \text{ мкг/л}$ ). К этой же группе относится проба воды, отобранная зимой из проруби р. Иркут в пос. Монды (рис. 6, а, ст. I).

По соотношению  $OA4/8 - 1/U$  воды Туран-Ильчирской сейсмической зоны существенно отличаются от вод Тумелик-Мондинской асейсмичной зоны. Воды Ниловской аномалии образуют самостоятельный тренд (Н) при низких значениях  $1/U$  (при повышенных концентрациях U). Наиболее высо-

кому значению  $OA4/8$  термальных вод станции NP-2 соответствует наиболее низкое значение  $1/U$  (максимальная концентрация U). Снижение значений  $OA4/8$  в пробах других станций Ниловской аномалии (NP-3, NP-1) сопровождается слабым возрастанием значений  $1/U$  (снижением концентраций U). Этот тренд круче тренда ТМВ. Станции Туранского разлома образуют другой тренд (Т), который может рассматриваться как окислительный (рис. 6, б).

## 6.2. ВРЕМЕННАЯ СМЕНА КОНЦЕНТРАЦИЙ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА СТАЦИИ MON-D

О временной смене источников вод на станции Mon-D свидетельствует резкое изменение концентраций элементов до и после 19.06.2014 г. Начальная концентрация Na находилась на уровне  $14000 \text{ мкг/л}$  и снизилась в 4–5 раз, почти до уровня концентрации этого элемента в воде р. Иркут (рис. 7, а). Начальная концентрация Si (более  $3000 \text{ мкг/л}$ ) соответствовала концентрациям этого элемента в



**Рис. 8.** Схема сопоставления аномалий  $OA4/8$  подземных вод с пространственно-временным распределением землетрясений в районе западного окончания Тункинской долины.

1 – эпицентр Мондинского землетрясения; 2–5 – участки высоких значений  $OA4/8$  и генерации землетрясений повышенной силы ( $K=11-14$ ): 2 – Туранский (а, б – соответственно, землетрясения 1958 и 1995 гг., в – станции с повышенными значениями  $OA4/8$ ), 3 – Ниловский (а, б – соответственно, землетрясения 1982–1994 и 2003 гг., в – станции с повышенными значениями  $OA4/8$ ), 4 – Верхнеиркутский (землетрясения 2007–2009 гг.), 5 – Хубсугул-Мондинский (а – землетрясения 2014 г., б – переход от высоких к низким значениям  $OA4/8$ ); 6 – смещение эпицентров землетрясений с повышенной силой в 2003–2014 гг.; 7 – Тумелик-Мондинская зона сейсмического затишья; 8 – разломы.

**Fig. 8.** Comparison between the  $OA4/8$  groundwater anomalies and the space-time patterns of earthquakes in the western termination of the Tunka valley.

1 – epicenter of the Mondy earthquake; 2–5 – sites with high  $OA4/8$  values and strong earthquakes ( $K=11-14$ ): 2 – Turan (a, б – respectively, earthquakes of 1958 and 1995, в – stations with increased  $OA4/8$  values), 3 – Nilova Pustyn (a, б – respectively, earthquakes of 1982–1994 and 2003, в – stations with increased  $OA4/8$  values), 4 – Upper Irkut (earthquakes of 2007–2009), 5 – Khubsugul-Mondy (a – earthquakes of 2014, б – transition from high to low  $OA4/8$  values); 6 – shift of the earthquake epicenters with high magnitudes, which took place in 2003–2014; 7 – Tumelik-Mondy zone of seismic quiescence; 8 – faults.

воде р. Горхонка и скв. Мон-Т и снизилась до уровня концентрации этого элемента в воде р. Иркут (около 2000 мкг/л) (рис. 7, б). Подобное относительное снижение получено для Li, Mo и других элементов (рис. 7, в, г).

### 6.3. ПЕРЕСТРОЙКА СЕЙСМОГЕНЕРИРУЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ

Пространственное совпадение выявленных аномалий  $OA4/8$  подземных вод с участками концентрации эпицентров землетрясений подчеркивается локализацией и миграцией сильных сейсмических событий (рис. 8). После Мондинского землетрясения 1950 г. эпицентр единичного сильного события обозначился через 8 лет в восточной части Ту-

ранского разлома (Туранская аномалия  $OA4/8$ ). В интервале 1982–1994 гг. произошла серия землетрясений, связанных с активизацией западной части Тункинского разлома (Ниловская аномалия  $OA4/8$ ). В 1995 и 2003 гг. сильные землетрясения повторились сначала в восточной части Туранского разлома, а затем – в западной части Тункинского. В 2007–2009 гг. эпицентры сильных землетрясений сместились в верховья р. Иркут, а в конце 2014 г. проявились на севере оз. Хубсугул.

Следовательно, 5-летний мониторинг станции Мон-Д совпал с перестройкой сейсмогенерирующей структуры западного окончания Тункинской долины, в процессе которой активизировалась северная часть Хубсугульской впадины. При общем

закрытом характере трещин до перестройки, препятствовавшей циркуляции подземных вод в Тумелик-Мондинской асейсмичной зоне, на станции Мон-D трещины оставались открытыми. Перестройка привела к частичному закрытию трещин этой станции, ограничившей циркуляцию глубинных вод.

Тренд ТМВ на рис. 6, а, включает фигуративную точку воды р. Горхонка, которая питается выходами родников Горхонского разлома, протянувшегося от ст. Мон-D по направлению к эпицентру Северо-Хубсугульского землетрясения 2014 г. Воды, образующие тренд ТМВ, трассируют этот разлом и, возможно, другие разломы северо-восточной ориентировки, закрывшиеся при этом землетрясении.

#### 6.4. Отличие развития сейсмического процесса на окончаниях Тункинской долины

Инверсионное перерождение структурных окончаний Тункинской долины было подчинено разным тектоническим процессам. Еловско-Култукская секция сжималась в результате расплющивания литосферного блока Хамар-Дабана у жесткого края кратонного фундамента Сибирской платформы. В отличие от нее, Ниловско-Мондинская секция играла роль связующего звена между центральной Тункинской впадиной рифтовой долины и Хубсугульским сегментом субмеридиональных впадин (Хубсугульской, Дархатской, Бусийнгольской впадин-подвесок, по Н.А. Флоренсову), которые, судя по характеру пространственно-временного распределения вулканизма, формировались как радиальные рифты во фронте Хангайского орогена [Chuvashova, Rasskazov, 2014]. Поднятие горного массива Мунку-Сардык началось 9 млн лет назад с надвиганием к северу на Окинское плоскогорье в последние 2.6 млн лет [Rasskazov, 1990]. В работе [Arzhannikova et al., 2007] предполагалось также позднечетвертичное развитие западной части долины в обстановке преобладания сдвига со сжатием, но без соответствующей аргументации.

Гидроизотопный мониторинг на разных станциях Култукского полигона показал, что при подготовке Голоустенского землетрясения 2015 г. ( $K=12.4$ ), эпицентр которого находился в акватории Южного Байкала, в 140 км от Култукского полигона, и небольших землетрясений непосредственно на Култукском полигоне сначала наблюдалось закрытие трещин, а затем их открытие с наполнением водой, сопровождавшееся переходом от крупноамплитудных вариаций  $OA4/8$  к малоамплитудным, обозначавшим сейсмоопасное состояние разлома [Rasskazov et al., 2018]. На станции Мон-D Мондинского полигона наблюдалась иная картина временных вариаций  $OA4/8$ . Этот пара-

метр последовательно снижался, отражая смену глубинных источников подземных вод близповерхностными при закрытии трещин в Тумелик-Мондинской асейсмичной зоне.

Выявленные соотношения аномалий  $OA4/8$  подземных вод с распределением землетрясений отразили развитие сейсмогенерирующих процессов вследствие взаимодействия сегмента Тункинской долины с сопредельными сегментами Байкальской рифтовой системы. Развитие сейсмогенерирующих процессов на ее обоих структурных окончаниях регулировалось пространственными переходами от зон сжатия к зонам растяжения. На восточном окончании долины расплющивание литосферы Еловско-Култукской секции сочеталось с растягиванием литосферы Южно-Байкальской впадины, в которой реализовывались сильные сейсмические толчки. На ее западном окончании сжатие обозначилось асейсмичной Тумелик-Мондинской зоной, сменяющимся растяжением в Туран-Ильчирской сейсмической зоне. Сжатие приводило к закрытию трещин, предотвращало циркуляцию подземных вод и не благоприятствовало сейсмичности. Растяжение способствовало раскрытию трещин, наполнению активных разломов подземными водами и реализации сейсмических событий. Эпицентр наиболее сильного Мондинского землетрясения 1950 г. локализовался на границе Тумелик-Мондинской и Туран-Ильчирской зон. Можно ожидать, что эпицентр следующего землетрясения с подобной силой будет также контролироваться этой границей.

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В структуре Тункинской долины была обособлена наиболее крупная и глубокая центральная Тункинская впадина, сменяющаяся на ее обоих окончаниях инверсионными Еловско-Култукской и Ниловско-Мондинской секциями, в которых определены высокие значения  $OA4/8$  подземных вод, совпавшие с участками концентрации эпицентров землетрясений. Для обоснования использования этого параметра в сейсмопрогностических целях в природных водах Мондинского полигона западного окончания Тункинской долины исследовались пространственные вариации  $OA4/8$  и проводился 5-летний мониторинг скважины Мон-D в Мондинской впадине. Задokumentировано ступенчатое снижение значений  $OA4/8$ , совпавшее по времени с подготовкой и реализацией землетрясения с энергетическим классом  $K=13.9$  на севере оз. Хубсугул. Это снижение свидетельствовало о последовательном закрытии трещин, препятствовавшем проникновению в них глубинных вод. Параллельный мониторинг  $OA4/8$  в подземных водах восточного

окончания долины, в районе пос. Култук, показал, что упругие напряжения реализовались здесь в закрытии, а затем – открытии трещин, способствовавших циркуляции глубинных вод и переходу активного Обручевского разлома Южно-Байкальской впадины в предсейсмогенное состояние.

Мондинская аномалия высоких значений  $OA4/8$  в подземных водах была обнаружена в Тумелик-Мондинской асейсмичной зоне, которая в целом характеризовалась низкими значениями этого параметра, свидетельствующими о непроницаемости трещин. Эта единственная аномалия асейсмичной зоны была нивелирована, тогда как активная циркуляция вод в Туранской и Ниловской аномалиях внутренней сейсмоактивной части Ниловско-Мондинской инверсионной секции продолжалась. Такой характер развития секции подчеркнул ее особую роль как промежуточного звена между Хубсугульским сегментом радиальных рифтов, образовавшихся во фронте Хангайского орогена, и цен-

тральной Тункинской впадиной рифтовой долины. В отличие от аномалий  $OA4/8$  и эпицентров землетрясений Ниловско-Мондинской секции, Култукская, Зактуйская и Северо-Торская аномалии Еловско-Култукской секции локализовались по ее периферии и обозначили границы Хамардабанского литосферного блока, расплющенного у края фундамента Сибирской платформы.

## 8. БЛАГОДАРНОСТИ

Природные воды изучались для разработки научных основ сейсмического прогноза в рамках государственного проекта Института земной коры № 0346-2016-0005. Авторы благодарят Т.Н. Рогачеву за помощь в регулярном отборе проб в с. Монды, а также В.И. Мельникову и А.И. Оргильянова за конструктивное обсуждение полученных результатов.

## 9. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Arzhannikova A.V., Melnikova V.I., Radziminovich N.A., 2007. Late Quaternary and current deformation in the western Tunka system. *Russian Geology and Geophysics* 48 (4), 305–311. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2007.03.001>.
- Bornyakov S.A., Ma J., Miroshnichenko A.I., Guo Y., Salko D.V., Zuev F.L., 2017. Diagnostics of meta-unstable state of seismically active fault. *Geodynamics & Tectonophysics* 8 (4), 989–998. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0328>.
- Chalov P.I., Tuzova T.V., Alekhina V.M., 1980. Isotopic Parameters of Water from Crustal Faults in a Seismically Active Zone. Ilim, Frunze, 105 p. (in Russian) [Чалов П.И., Тузова Т.В., Алехина В.М. Изотопные параметры вод разломов земной коры в сейсмически активной зоне. Фрунзе: Илим, 1980. 105 с.].
- Chebykin E.P., Goldberg E.L., Kulikova N.S., Zhuchenko N.A., Stepanova O.G., Malopevnaya Y.A., 2007. A method for determination of the isotopic composition of authigenic uranium in Baikal bottom sediments. *Russian Geology and Geophysics* 48 (6), 468–477. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2007.06.008>.
- Chebykin E.P., Rasskazov S.V., Vodneva E.N., Ilyasova A.M., Chuvashova I.S., Bornyakov S.A., Seminsky A.K., Snopkov S.V., 2015. First results of  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  monitoring in water from active faults on the western coast of South Baikal. *Doklady Earth Sciences* 460 (2), 142–145. <https://doi.org/10.1134/S1028334X15020075>.
- Cherdyntsev V.V., 1969. Uranium-234. Atomizdat Press, Moscow, 308 p. (in Russian) [Чердынцев В.В. Уран-234. М.: Атомиздат, 1969. 308 с.].
- Chuvashova I.S., Rasskazov S.V., 2014. Sources of Magmatism in the Mantle of the Evolving Earth. Irkutsk State University Publisher, Irkutsk, 291 p. (in Russian) [Чувашова И.С., Рассказов С.В. Источники магматизма в мантии эволюционирующей Земли. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2014. 291 с.].
- Delouis B., Déverchère J., Melnikova V., Radziminovitch N., Loncke L., Larroque C., Ritz J.F. and San'kov V., 2002. A reappraisal of the 1950 (Mw 6.9) Mondy earthquake, Siberia, and its relationship to the strain pattern at the south-western end of the Baikal rift zone. *Terra Nova* 14 (6), 491–500. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3121.2002.00445.x>.
- Doser D.I., 1991. Faulting within the western Baikal rift as characterized by earthquake studies. *Tectonophysics* 196 (1–2), 87–107. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(91\)90291-Y](https://doi.org/10.1016/0040-1951(91)90291-Y).
- Finkel R.C., 1981. Uranium concentrations and  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  activity ratios in fault-associated groundwater as possible earthquake precursors. *Geophysical Research Letters* 8 (5), 453–456. <https://doi.org/10.1029/GL008i005p00453>.
- Florensov N.A., 1960. Mesozoic and Cenozoic Basins of the Baikal Region. Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, Moscow – Leningrad, 258 p. (in Russian) [Флоренсов Н.А. Мезозойские и кайнозойские впадины Прибайкалья. М.–Л.: Изд-во Академии наук СССР, 1960. 258 с.].
- Florensov N.A. (Ed.), 1973. Tectonics and Volcanism of the Southwestern Part of the Baikal Rift Zone. Nauka, Novosibirsk, 136 p. (in Russian) [Тектоника и вулканизм юго-западной части Байкальской рифтовой зоны / Ред. Н.А. Флоренсов. Новосибирск: Наука, 1973. 136 с.].

- Golenetskii S.I., 1998. Seismicity of the region of the Tunka basins on the southwestern flank of the Baikal rift in the light of experimental observations carried out in the second half of the XX century. *Geologiya i Geofizika (Russian Geology and Geophysics)* 39 (2), 260–270.
- Golenetsky S.I., 1990. The problem of studying the seismicity of the Baikal rift. In: N.A. Logachev (Ed.), *Geodynamics of intracontinental mountain regions*. Nauka, Novosibirsk, p. 228–235. [Голенецкий С.И. Проблема изучения сейсмичности Байкальского рифта // Геодинамика внутриконтинентальных горных областей / Ред. Н.А. Логачев. Новосибирск: Наука, 1990. С. 228–235].
- Kashik S.A., Mazilov V.N., 1994. Main stages and paleogeography of Cenozoic sedimentation in the Baikal rift system (Eastern Siberia). *Bulletin des Centres de Recherches Exploration-Production Elf Aquitaine* 18 (2), 453–461.
- Logachev N.A., 1974. Sayan-Baikal and Stanovoy Highlands. Highlands of Baikal Region and Transbaikalia. Nauka, Moscow, 359 p. (in Russian) [Логачев Н.А. Саяно-Байкальское становое нагорье. Нагорья Прибайкалья и Забайкалья. М.: Наука, 1974. 359 с.].
- Logachev N.A. (Ed.), 1993. Seismotectonics and Seismicity of Lake Khövsgöl Region. Nauka, Siberian Publishing Company, Novosibirsk, 184 p. (in Russian) [Сейсмотектоника и сейсмичность Прихубсугуля / Ред. Н.А. Логачев. Новосибирск: Наука, Сибирская издательская фирма, 1993. 184 с.].
- Logachev N.A., Rasskazov S.V., Ivanov A.V., Levy K.G., Bukharov A.A., Kashik S.A., Sherman S.I., 1996. Cenozoic rifting in the continental lithosphere. In: N.A. Logachev (Ed.), *Lithosphere of Central Asia*. Nauka, Novosibirsk, 57–80 (in Russian) [Логачев Н.А., Рассказов С.В., Иванов А.В., Леву 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].
- Map of earthquake epicenters in the last ten days, 2017. The Baikal Branch of the Geophysical Survey (in Russian) [Карта эпицентров последних десяти землетрясений. Байкальский филиал Геофизической службы, 2017]. Available from: <http://www.seis-bykl.ru/index.php?ma=1>.
- Mel'nikova V.I., Gileva N.A., Arefev S.S., Bykova V.V., Masal'skii O.K., 2012. The 2008 Kultuk earthquake with  $M_w=6.3$  in the south of Baikal: Spatial-temporal analysis of seismic activation. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 48 (7–8), 594–614. <https://doi.org/10.1134/S1069351312060031>.
- Melnikova V.I., Gilyova N.A., Radziminovich Ya.B., Drennova N.N., Radziminovich N.A., 2009. September 17, 2003 Hoi-togol earthquake with  $M_{PSP}=4.8$ ,  $K_R=13.8$ ,  $I_0=6-7$  (Baikal region). In: *Earthquakes of Northern Eurasia in 2003*. GS RAS, Obninsk, p. 310–325 (in Russian) [Мельникова В.И., Гилёва Н.А., Радзиминович Я.Б., Дреннова Н.Н., Радзиминович Н.А. Хойтогольское землетрясение 17 сентября 2003 года с  $M_{PSP}=4.8$ ,  $K_R=13.8$ ,  $I_0=6-7$  (Прибайкалье) // Землетрясения Северной Евразии, 2003 год. Обнинск: ГС РАН, 2009. С. 310–325].
- Misharina L.A., 1967. Stresses in the Earth's Crust in Rift Zones. Nauka, Moscow, 135 p. (in Russian) [Мишарина Л.А. Напряжения в земной коре в рифтовых зонах. М.: Наука, 1967. 135 с.].
- Misharina L.A., Melnikova V.I., Balzhinnyam I., 1983. Southwestern boundary of the Baikal rift zone from data on the mechanism of earthquake foci. *Vulkanologiya i Seismologiya* (2), 74–83 (in Russian) [Мишарина Л.А., Мельникова В.И., Балжинням И. Юго-западная граница Байкальской рифтовой зоны по данным о механизме очагов землетрясений. *Вулканология и сейсмология*. 1983. № 2. С. 74–83].
- Parfeevets A.V., Sankov V.A., 2006. Stress State of the Earth's Crust and Geodynamics of the Southwestern Part of the Baikal Rift System. Geo Academic Publishing House, Novosibirsk, 151 p. (in Russian) [Парфеевец 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.].
- Rasskazov S.V., 1990. Pliocene-Quaternary thrust in the South of the Oka plateau (Eastern Sayan). *Geologiya i Geofizika (Soviet Geology and Geophysics)* 31 (5), 134–138. [Рассказов С.В. Плиоцен-четвертичный надвиг на юге Окинского плоскогорья (Восточный Саян). *Геология и геофизика*. 1990. Т. 31. № 5. С. 134–138].
- Rasskazov S.V., 1993. Magmatism of the Baikal Rift System. Nauka, Siberian Publishing Company, Novosibirsk, 288 p. (in Russian) [Рассказов С.В. Магматизм Байкальской рифтовой системы. Новосибирск: Наука, Сибирская издательская фирма, 1993. 288 с.].
- Rasskazov S.V., Chebykin E.P., Ilyasova A.M., Vodneva E.N., Chuvashova I.S., Bornyakov S.A., Seminsky A.K., Snopkov S.V., Chechel'nitsky V.V., Gileva N.A., 2015. Creating the Kultuk polygon for earthquake prediction: variations of  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  and  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  in groundwater from active faults at the western shore of Lake Baikal. *Geodynamics & Tectonophysics* 6 (4), 519–553 (in Russian) [Рассказов С.В., Чебыкин Е.П., Ильасова 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  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  и  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в подземных водах из активных разломов западного побережья Байкала // Геодинамика и тектонофизика. 2015. Т. 6. № 4. С. 519–553]. <https://doi.org/10.5800/GT-2015-6-4-0192>.
- Rasskazov S., Ilyasova A., Bornyakov S., Chuvashova I., Chebykin E., 2018. Responses of a  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  activity ratio in groundwater to earthquakes of the South Baikal basin, Siberia. *Journal of Environmental Radioactivity* (in press).
- Rasskazov S.V., Logachev N.A., Ivanov A.V., 1998. Correlation of Late Cenozoic tectono-magmatic events between the Baikal rift system and the Southeastern Eurasian plate. *Geotectonics* 32 (4), 272–285.



- Ryazanov G.V., 1978. The stress fields and structures formation conditions in the southwestern flank of the Baikal rift zone. *Doklady AN SSSR* 243 (1), 183–186 (in Russian) [Рязанов Г.В. Поля напряжений и условия формирования структур юго-западного фланга Байкальской рифтовой зоны // Доклады АН СССР. 1978. Т. 243. № 1. С. 183–186].
- Semenov R.M., Kashkovsky V.V., Lopatin M.N., 2018. Model of tectonic earthquake preparation and occurrence and its precursors in conditions of crustal stretching. *Geodynamics & Tectonophysics* 9 (1), 165–175 (in Russian) [Семенов Р.М., Кашковский В.В., Лопатин М.Н. Модель подготовки и реализации тектонического землетрясения и его предвестников в условиях растяжения земной коры // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 1. С. 165–175]. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-1-0343>.
- Seminsky K.Z., Rasskazov S.V., Seminsky A.K., Mikheeva E.A., 2014. Radon in “nonradonic” ground waters of the Baikal region: Spatial and temporal variations. *Doklady Earth Sciences* 457 (2), 991–996. <https://doi.org/10.1134/S1028334X14080169>.
- Seredkina A.I., Melnikova V.I., 2014. Seismic moment tensor of Pribaikalye earthquakes from the surface-wave amplitude spectra. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 50 (3), 403–414. <https://doi.org/10.1134/S1069351314030094>.
- Sherman S.I., Levi K.G., 1977. Transform faults of the Baikal Rift Zone. *Doklady AN SSSR* 233 (2), 454–464 (in Russian) [Шерман С.И., Леви К.Г. Трансформные разломы Байкальской рифтовой зоны. Доклады АН СССР. 1977. Т. 233. № 2. С. 454–464].
- Sherman S.I., Lysak S.V., Gorbunova E.A., 2012. A tectonophysical model of the Baikal seismic zone: testing and implications for medium-term earthquake prediction. *Russian Geology and Geophysics* 53 (4), 392–405. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2012.03.003>.
- Solonenko A.V., Solonenko N.V., Melnikova V.I., Kozmin B.M., Kuchai O.A., Sukhanova S.S., 1993. Strains and displacements in earthquake foci of Siberia and Mongolia. In: Seismicity and seismic zoning of Northern Eurasia, Vol. 1. UIPE, Moscow, p. 113–122 (in Russian) [Солоненко А.В., Солоненко Н.В., Мельникова В.И., Козьмин Б.М., Кучай О.А., Суханова С.С. Напряжения и подвижки в очагах землетрясений Сибири и Монголии // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. Вып. 1. М.: ОИФЗ РАН, 1993. С. 113–122].
- Solonenko V.P. (Ed.), 1975. Seismotectonics and Seismicity of the Southeastern Part of the Eastern Sayan. Nauka, Novosibirsk, 134 p. (in Russian) [Сеймотектоника и сейсмичность юго-восточной части Восточного Саяна / Ред. В.П. Солоненко. Новосибирск: Наука, 1975. 134 с.].
- The Global Centroid-Moment-Tensor (CMT) Project, 2018. Available from: <http://www.globalcmt.org>.
- Treskov A.A., Florensov N.A., 1952. Mondy earthquake in 1950. In: Bulletin of the Council for Seismology of the USSR Academy of Sciences. No. 2A. Publishing House of the USSR Academy of Sciences, Moscow, p. 6–18 (in Russian) [Тресков А.А., Флоренсов Н.А. Мондинское землетрясение 1950 г. // Бюллетень совета по сейсмологии АН СССР. № 2А. М.: Изд-во АН СССР, 1952. С. 6–18].
- Zorin Yu.A., 1971. The Newest Structure and Isostasy of the Baikal Rift Zone and Contiguous Territories. Nauka, Moscow, 168 p. (in Russian) [Зорин Ю.А. Новейшая структура и изостазия Байкальской рифтовой зоны и сопредельных территорий. М.: Наука, 1971. 168 с.].
- Zverev V.L., Dolidze N.I., Spiridonov A.I., Cheshko A.L., Chkhenkeli Sh.M., 1975. Anomaly of the even uranium isotopes in the groundwater of seismically active regions of Georgia. *Geokhimiya* (11), 1720–1724 (in Russian) [Зверев В.Л., Дolidze Н.И., Спиридонов А.И., Чешко А.Л., Чхенкели Ш.М. Аномалия четных изотопов урана в подземных водах сейсмоактивных районов Грузии // Геохимия. 1975. № 11. С. 1720–1724].



**Сергей Васильевич Рассказов**, докт. геол.-мин. наук, профессор, зав. лабораторией  
Институт земной коры СО РАН  
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия  
Иркутский государственный университет, геологический факультет  
664003, Иркутск, ул. Ленина, 3, Россия

✉ e-mail: [rassk@crust.irk.ru](mailto:rassk@crust.irk.ru)

**Sergei V. Rasskazov**, Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Head of Laboratory  
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS  
128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia  
Irkutsk State University, Geological Faculty  
3 Lenin street, Irkutsk 664003, Russia



**Айгуль Маратовна Ильясова**, канд. геол.-мин. наук  
Институт земной коры СО РАН  
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

e-mail: [ila@crust.irk.ru](mailto:ila@crust.irk.ru)

**Aigul M. Pyasova**, Candidate of Geology and Mineralogy  
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS  
128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia



**Ирина Сергеевна Чувашова**, канд. геол.-мин. наук, с.н.с.  
Институт земной коры СО РАН  
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия  
Иркутский государственный университет, геологический факультет  
664003, Иркутск, ул. Ленина, 3, Россия

e-mail: [chuvashova@crust.irk.ru](mailto:chuvashova@crust.irk.ru)

**Irina S. Chuvashova**, Candidate of Geology and Mineralogy, Senior Researcher  
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS  
128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia  
Irkutsk State University, Geological Faculty  
3 Lenin street, Irkutsk 664003, Russia



**Евгений Павлович Чебыкин**, канд. хим. наук, с.н.с.  
Институт земной коры СО РАН  
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия  
Лимнологический институт СО РАН  
664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3, Россия

e-mail: [cheb@lin.irk.ru](mailto:cheb@lin.irk.ru)

**Eugene P. Chebykin**, Candidate of Chemistry, Senior Researcher  
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS  
128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia  
Limnological Institute, Siberian Branch of RAS  
3 Ulan-Batorskaya street, Irkutsk 664033, Russia