Мониторинг окружающей среды

УДК 550.844+546.791.027+632.126 https://doi.org/10.26516/2541-9641.2022.4.7

Тестирование эффекта Чердынцева–Чалова с использованием сейсмовибратора ЦВО-100 и мониторинг подобных Uгидроизотопных откликов на подготовку землетрясений на Култукском полигоне, Южный Байкал

А.М. Ильясова¹, С.В. Рассказов^{1,2}, Е.П. Чебыкин^{1,3}, С.А. Борняков¹, С.В. Снопков², И.С. Чувашова^{1,2}, Ц.А. Тубанов⁴, Е.И. Герман⁴, С.В. Бартанова⁴

¹Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия ²Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия ³Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск, Россия ⁴Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия

Аннотация. Приводятся результаты эксперимента на Бабушкинском полигоне и мониторинговых наблюдений вариаций отношения активностей ²³⁴U/²³⁸U в подземных водах из палеосейсмогенной дислокации в зоне Главного Саянского разлома. Отмечается сходство эффектов, полученных в эксперименте и на мониторинговой станции в 2014 г., но отсутствие подобных эффектов при подготовке и реализации сильного Быстринского землетрясения 2020 г. Делается вывод о том, что для успешного прогноза сильного землетрясения мониторинговое наблюдение единичной станции недостаточно. Необходима поддержка гидрогеохимического мониторинга нескольких станций, расположенных на полигоне в разных структурных условиях и несущих разнородную информацию о меняющихся во времени сейсмогенных деформациях.

Ключевые слова: ²³⁴U/²³⁸U, подземные воды, мониторинг, прогноз землетрясений, Байкал.

Testing the Cherdyntsev–Chalov effect using a seismic vibrator ЦВО-100 and monitoring of similar U-hydroisotopic responses to earthquake preparation in the Kultuk test site, Southern Baikal

A.M. Ilyasova¹, S.V. Rasskazov^{1,2}, E.P. Chebykin^{1,3}, S.A. Bornyakov¹, S.V. Snopkov², I.S. Chuvashova^{1,2}, Ts.A. Tubanov⁴, E.I. German⁴, S.V. Bartanova⁴

¹Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia
²Irkutsk State University, Irkutsk, Russia
³Limnological Institute SB RAS, Irkutsk, Russia
⁴N.L. Dobretsov Geological Institute SB RAS, Ulan-Ude, Russia

Abstract. The results of an seismic variation experiment at the Babushkin test site and monitoring observations of the ${}^{234}\text{U}/{}^{238}\text{U}$ activity ratio in groundwater from a paleoseismogenic dislocation in a zone of the Main Sayan Fault are presented. Found is a similarity between effects obtained in the experiment and data at the monitoring station in 2014, but no similar effects during preparation and realization of the strong Bystraya earthquake in 2020. It is inferred that the monitoring observation of a single station is not enough for a successful prediction of a strong earthquake. It is necessary to

support hydrogeochemical monitoring of several stations located on the test site in different structural conditions and provided different information on seismogenic deformations that change over time.

Keywords: ²³⁴U/²³⁸U, groundwater, monitoring, earthquake prediction, Baikal.

Введение

В.В. Черлыниевым и П.И. Чаловым был обнаружен процесс обогащения природных вод изотопом²³⁴U при переходе в них урана из твердых пород. В сейсмоактивных зонах основной причиной такого процесса служит развитие дислокаций в урансодержащих минералах, которое, как предполагается, приводит к возрастанию отношений активностей урана ²³⁴U/²³⁸U (OA4/8)¹ в подземных водах (Чердынцев, 1969, 1973; Чалов, 1975). Со времени открытия эффекта предлагались его различные объяснения (Киселев, Зыков, 2013). В одной из последних гипотез допускается инициирование ускорения радиоактивного распада ядер урана-238 при переходе из твердой фазы в жидкую в процессах трещинообразования. Согласно этой гипотезе, основное значение имеют разрывы сплошности твердофазной среды, которые приводят к повышению значений механических растягивающих напряжений и возникновению высоких локальных электрических полей, что обусловливает инжекцию высокоэнергетических (по химическим масштабам) электронов в водную фазу образующихся трещин. В этих условиях могут реализоваться процессы ее-каталитического распада ядра урана-238 при образовании метастабильного ядра протоактиний-238 с локально нарушенной нуклонной структурой, которое претерпевает последующий β-распад с образованием ядер тория-234 и гелия-4 как продуктов распада исходного ядра урана-238 при характерном периоде в несколько лет (Тимашев, 2018). В мониторинге гидроизотопных откликов на сейсмические события, кроме ОА4/8, информативны активность ²³⁴U (А4) и концентрация U. В мониторинге станций Култукского полигона эффект Чердынцева-Чалова рассматривается как следствие механического состояния микротрещин: открытия, способствующего циркуляции подземных вод с возрастанием ОА4/8 и А4, и закрытия, предотвращающего циркуляцию со снижением обоих параметров (Чебыкин и др., 2022; Rasskazov et al., 2020, 2022).

Изучение землетрясений в Байкальской сейсмической зоне имеет длительную историю (Solonenko et al., 1985; Шерман, 2014). К настоящему времени накоплен опыт теоретического анализа землетрясений (Ружич, 1997; Sherman, 2009, 2013; Тимофеев и др., 2013; Семенов и др., 2018], в том числе с проведением деформационного мониторинга в активных разломах (Bornyakov et al., 2015, 2017). Во время сильного Култукского землетрясения на Южном Байкале (Mw=6.3) в 2008 г. (Мельникова и др., 2012) эпицентр находился в 40 км к востоку-юго-востоку от пос. Култук, расположенного на западной оконечности озера. Судя по пространственной последовательности проявления афтершоков этого землетрясения, сейсмогенное вспарывание разрывов было направлено от его эпицентра к этому поселку, поэтому район пос. Култук был обозначен как место потенциального очага будущего сильного землетрясения. Предполагалось, что будет вскрыта зона Главного Саянского разлома (Добрынина, Саньков, 2008). Этот прогноз был воспринят как надвигающаяся угроза катастрофического события для областного центра Иркутск с населением почти 624 тыс. человек. Для регистрации его приближения был организован гидрогеохимический мониторинг в подземных водах Култукского сейсмопрогностического полигона, на котором основное значение имела регистрация эффекта Чердынцева-Чалова (Рассказов и др., 2015; Чебыкин и др., 2015). При начальных наблюдениях на Култукском полигоне в 2012-2013 гг. был определен колебательный характер временных вариаций OA4/8 и концентрации U с менявшимися во времени длительностями и амплитудами колебаний и выявлена синхронизация циклов ОА4/8 на станциях, сопровождавшаяся слабыми сейсмическими событиями (К=9-10) непосредственно в районе полигона 24.04.2013 и 07.06.2013. Был сделан вывод о том, что в 2013 г. кора Култукского полигона испытывала деформации по сценарию активизации западного окончания Обручевского разлома за счет триггерного эффекта, наведенного из его центральной части. Дальнейшие наблюдения привели

¹ Циклическое равновесие OA4/8 соответствует атомному отношению 5.47×10^{-5} .

к обоснованию полного сейсмогеодинамического цикла сжатия и растяжения в центральной части Байкальской рифтовой системы с кульминациями, соответственно, в 2015 и 2020–2021 гг. (Чебыкин и др., 2022; Rasskazov et al., 2022).

Пониманию причин эффекта Чердынцева-Чалова способствуют экспериментальные наблюдения изотопного фракционирования урана. Такой процесс определялся при частичном замораживании замкнутого объема воды (Яковлев и др., 2016). Условия фракционирования изотопов урана, воспроизведенные в этом эксперименте, однако, не имеют отношения к возрастанию ОА4/8 в результате сейсмического процесса. Поскольку допускается существование различных причин обогащения воды относительно твердой фазы (Киселев, Зыков, 2013; Рассказов и др., 2020), необходима постановка эксперимента, который соответствовал бы первичному определению этого эффекта как процесса обогащения природных вод изотопом ²³⁴U при переходе в них урана из вмещающих пород в сейсмоактивной зоне.

Для обоснования метода регистрации Uгидроизотопных откликов на землетрясения в октябре 2016 г. были выполнены эксперименты с применением вибросейсмической установки ЦВО-100 Бабушкинского полигона, расположенного рядом с поселком Сухой Ручей (СР) в Кабанском районе Республики Бурятия (Kovalevsky et al., 2022). Предварительные результаты регистрации гидроизотопных откликов в эксперименте с сейсмовибратором докладывались на конференции (Рассказов и др., 2018). В настоящей работе приводятся результаты наблюдений в эксперименте и сопоставление полученных результатов с природными вариациями концентрации U, OA4/8 и A4 в родниковой воде станции 14k Култукского полигона, расположенного на побережье западного окончания Байкала (рис. 1). Параметры урана этой станции близки к параметрам воды станции СР. Выход родника находится в зоне Главного Саянского разлома (ГСР), на палеосейсмогенной дислокации (Рассказов и др., 2015).



Рис. 1. Схема местоположения Бабушкинского полигона с сейсмовибрационной установкой и пункт мониторинговых наблюдений 14k Култукского сейсмопрогностического полигона. Звездочками отмечены эпицентры землетрясений, зарегистрированных в 2013–2014 гг. Байкальским филиалом Федерального исследовательского центра "Единая геофизическая служба Российской академии наук" (Карта..., 2022, http://www.seis-bykl.ru) в западной части Южно-Байкальской впадины.

Fig. 1. Scheme of the location of the Babushka polygon with a seismic vibration unit and monitoring observation point 14k of the Kultuk seismic prognostic polygon. Stars mark earthquake epicenters recorded in 2013–2014 by the Baikal Branch of the Federal Research Center "Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences" (Kapra..., 2022, http://www.seis-bykl.ru) in the western part of South Baikal Basin.

Методика аналитических исследований природной воды

В воде родника проводилось опробование в среднем с частотой от 2 до 4 недель. В отдельные периоды частота опробования составляла 3-4 дня. Мониторинг изотопных отношений урана проводился с сентября 2012 г. и продолжается до сих пор. В этот период вблизи полигона были зарегистрированы сейсмические толчки 9 и 10 энергетического класса. Для аналитических исследований пробы объемом 0.5 л отбирали в бутылки из полиэтилентерефталата (ПЭТ) из-под глубинной байкальской воды. Фабрично запечатанную бутылку с байкальской водой вскрывали непосредственно перед отбором пробы, опорожняли и тщательно ополаскивали отбираемой пробой. Использовали также чистые фабричные бутылки. Отобранные пробы сразу пропускали через мембранные фильтры (0.45 мкм), фиксировали азотной кислотой (ОСЧ), дважды перегнанной с помощью системы суббойлинговой перегонки Savillex DST–1000. Пробы хранили в холодильнике (до 3 месяцев).

Определение концентрации U, OA4/8 и А4 проводили методом ИСП-МС на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500се. Изотопный состав урана в природных водах определяли по разработанной методике. Для измерений выделяли 20 мкг урана на ионообменной смоле TRU (Eichrom). Образцы воды фильтровали (0.45 мкм), подкисляли азотной кислотой (3 %) и загружали в ионообменные полипропиленовые колонки, содержащие 0.5 мл смолы TRU. Уран элюировали 1.5 мл 0.1 М оксалата аммония (NH₄)C₂O₄. Элюаты разбавляли в 2 раза 3 %-ной HNO₃ и анализировали методом ИСП-МС согласно подходам (Чебыкин и др., 2007, 2015). Типичная относительная ошибка определения изотопного отношения ~1 %, концентрации урана – около 5 %. Для контроля качества измерений применяли стандартный образец изотопного состава природного урана ГСО 7521-99 (Уральский электрохимический комбинат, г. Новоуральск). Предварительно в пробах определялся спектр 72 химических элементов.

Условия и результаты эксперимента с сейсмовибратором

Для регистрации эффекта Чердынцева– Чалова в экспериментальных условиях проводили отбор воды из скважины глубиной 35 м, расположенной на территории стационара ГИН СО РАН «Сухой Ручей» (станция СР), на расстоянии 73 м от центра низкочастотного виброисточника ЦВО-100 (вибратора) (рис. 2). Эксперимент проводили с отбором проб в течение 19 часов 35 минут (с 16.00 10.10.2016 до 11.35 11.10.2016). Порядок опробования приведен в табл. 1. Отобрали восемь проб воды. Экспериментальные данные измерений концентраций и изотопных отношений урана приведены в табл. 2.



Рис. 2. Местоположение скважины и виброисточника на стационаре ГИН СО РАН «Сухой Ручей».

Fig. 2. Location of the well and vibration source in the station of the GIN SB RAS "Sukhoy Ruchey".

Таблица 1

Дата	Время	Операция	Проба
10.10.16	16:00	Отбор пробы	CP-1/16
10.10.16	20:00	Запуск ЦВО-100	
10.10.16	20:50	Отбор пробы	CP-2/16
10.10.16	20:55	Отключение ЦВО-100	
10.10.16	22:05	Отбор пробы	CP-3/16
10.10.16	22:10	Запуск ЦВО-100	
10.10.16	22:55	Отбор пробы	CP-4/16
10.10.16	23:05	Отключение ЦВО-100	
11.10.16	02:40	Отбор пробы	CP-5/16
11.10.16	08:15	Отбор пробы	CP-6/16
11.10.16	09:45	Запуск ЦВО-100	
11.10.16	10:10	Отбор пробы	CP-7/16
11.10.16	10:15	Отключение ЦВО-100	
11.10.16	11:35	Отбор пробы	CP-8/16

Последовательность отбора проб воды на станции СР

Таблица 2

Результаты измерений U и ОА4/8 в водных пробах станции СР

Проба	U, мкг/дм ³	OA4/8	RSD, %
CP-1/16	0.33	1.03	1.3
CP-2/16	0.31	1.03	1.3
CP-3/16	0.31	1.06	1.3
CP-4/16	0.30	1.06	1.2
CP-5/16	0.31	1.08	1.2
CP-6/16	0.37	1.05	1.4
CP-7/16	0.29	1.03	1.3
CP-8/16	0.31	1.07	1.3

Вариации концентрации U и ОА4/8

Первая отобранная проба CP-1/16 характеризует исходный состав воды скважины: U = 0.33 мкг/дм³, OA4/8 = 1.03. Через четыре часа был запущен ЦВО-100 и после пятидесяти минут вибросейсмических колебаний отобрана следующая проба CP-2/16. Концентрация U в пробе снизилась до 0.31 мкг/дм³ при ОА4/8, идентичном исходному (1.03). Сейсмовибратор отключался. Через 70 минут после его отключения отобрали пробу СР-3/16, в которой наблюдалось увеличение изотопного параметра ОА4/8 до значения 1.06 при неизменной концентрации U (0.31 мкг/дм³). Возрастание ОА4/8 свидетельствовало о начале проявления эффекта Чердынцева–Чалова (рис. 3а).



Рис. 3. Вариации концентрации урана (*a*) и OA4/8 (б) в подземных водах станции CP в зависимости от работы сейсмовибратора ЦВО-100. Интервалы времени работы показаны в закрашенных прямоугольниках. На оси абсцисс нанесено время отбора проб. Показаны отношения активностей изотопов урана. Погрешности измерений указаны отрезками. Для упрощения рисунка обозначения проб CP-1/16 и др. сокращены до обозначения 1 и др.

Fig. 3. Variations in the uranium concentrations (*a*) and AR4/8 (activity ratio 4/8) (*b*) in the groundwater of the SR station depending on the operation of the seismic vibrator TsVO-100. Operating time intervals are shown in filled boxes. Time of sampling is indicated on the abscissa-axis. Ratios of activities of uranium isotopes are shown. Measurement errors are indicated by segments. To simplify the figure, designations of samples SR-1/16 and others are reduced to those 1 and others.

Второе включение сейсмовибратора на 55 минут завершилось отбором пробы СР-4/16. Ее состав был практически идентичен составу третьей пробы (U = 0.30 мкг/дм³, OA4/8 = 1.06). Через 3.5 часа после отключения сейсмовибратора была отобрана проба СР-5/16. В ней при низкой (близкой к средней) концентрации урана (U = 0.31 мкг/дм³) регистрировалось аномальное возрастание изотопного параметра OA4/8 до 1.08. В следующей пробе СР-5/16, отобранной через 5 часов 35 минут после пробы СР-4/16, произошло относительное снижение изотопного параметра OA4/8 (до 1.05) при возросшей концентрации U (до 0.37 мкг/дм³).

Третий этап работы сейсмовибратора через 25 минут после включения сопровождался отбором пробы СР-7/16. В ней продолжилось снижение ОА4/8 до исходного значения воды скважины (1.03) при резком выходе концентрации урана на минимум (0.29 мкг/дм³). Далее, после полуторачасового периода тишины, была отобрана заключительная проба СР-8/16, в которой вновь отчетливо проявился эффект Чердынцева–Чалова в относительном возрастании изотопного отношения ОА4/8 (до 1.07) при низкой концентрации U, близкой к средней (0.31 мкг/дм³). В переходе состава U от пробы СР-7/16 к пробе СР-8/16 повторилась смена состава урана, наблюдавшаяся после первого включения сейсмовибратора от пробы СР-2/16 к пробе СР-3/16.

Вариации активности ²³⁴U (А4)

На графике, приведенном на рис. 4, в подземных водах из скважины в эксперименте с сейсмовибратором наблюдаются относительные вариации А4, подобные вариациям концентрации U. Исходный состав пробы СР-1/16 (А4 = 0.34 единицы активности) снижался в пробах СР-2/16– СР-4/16 при двукратном включении ЦВО-100 на 55 минут

с перерывом в 1 час 10 минут с последующим увеличением А4 в пробах СР-5/16 и СР-6/16 до 0.39 единиц активности (после отключения сейсмовибратора). К моменту отбора пробы СР-7/16 во время третьего включения сейсмовибратора активность ²³⁴U снизилась до 0.30 единиц, а при его выключении вновь резко возросла в пробе СР-8/16.



Рис. 4. Изменение активности ²³⁴U в водных пробах (обозначенных номерами от 1 до 8) скважины «Сухого Ручья» в зависимости от работы ЦВО-100.

Fig. 4. Change in activity of 234 U in water samples (marked by numbers from 1 to 8) of the well "Sukhoy Ruchey" depending on the operation of TsVO-100.

Результаты мониторинга ст. 14k

Согласованность вариаций концентрации U с годичной сменой паводковых и меженных режимов, выявление сейсмогенного нарушения согласованности

Мониторинг воды в роднике Тигунчиха (ст. 14k) показывает чередование во времени согласованных и несогласованных вариаций концентрации U с годичной сменой паводковых и меженных режимов. В конце паводкового (весенне-летнего) интервала (приблизительно, 1 сентября) концентрация U находится на минимуме, а в середине-конце меженного (зимне-весеннего) интервала (приблизительно, в феврале-марте) выходит на максимум. В 2012 г. определена согласованная вариация концентрации U, продлившаяся до перехода от паводкового к меженному режиму осенью 2013 г. (октябрь-ноябрь). Во время меженного режима регулярность вариации концентрации U в связи с годичной сменой паводковых и меженных режимов была

нарушена и восстановилась только при переходе от меженного к паводковому режиму в 2016 г. (апрель-май). В дальнейшем согласование вариаций концентрации U с годичной сменой паводковых и меженных режимов продолжалось до перехода от паводкового к меженному режиму в 2018 г. (октябрь-ноябрь) (рис. 5).

Нарушение согласованности вариации концентрации U в родниковой воде с годичной сменой паводковых и меженных режимов в 2013-2016 гг. объясняется влиянием сейсмогенных деформаций, активизированных в зоне ГСР. Переход от согласованных к несогласованным вариациям концентрации U в 2013 г. соответствовал Муринской активизации Южно-Байкальской впадины, а переход от несогласованных к согласованным вариациям концентрации U в 2016 г. – завершению активности Голоустно-Котовской эпицентральной линии. На фоне согласованных вариаций концентрации U эпицентры землетрясений перераспределились из Голоустно-Котовской эпицентральной линии в Котовско-Муринскую (Rasskazov et al., 2021). Такие временные соотношения откликов U в родниковой воде на сейсмогенные деформации в зоне ГСР с сейсмической активностью западной части Южно-Байкальской впадины воспринимаются как показатель главной роли деформаций в Южно-Байкальской впадине и вторичной (возможно, наведенной из этой впадины) – в ГСР.

Выделяются 3 эпизода нарушения сезонных вариационных траекторий концентрации U: 1) 2013–2014 гг., 2) 2014–2015 гг. и 3) 2015-2016 гг. В течение каждого эпизода наблюдается резкое снижение концентрации U и следующее за ним резкое возрастание концентрации U. С первым эпизодом связано слабое землетрясение 19.03.2014 в районе Култукского полигона. Между вторым и третьим эпизодами произошло более сильное (K=12.4)Голоустное землетрясение 05.09.2015. По сравнению с амплитудой вариаций концентрации U в воде первого эпизода, амплитуда вариаций концентрации U в воде второго эпизода увеличилась. Следовательно, в 2013-2014 гг. слабые сейсмогенные

деформации в ГСР и Южно-Байкальской впадине были синхронными, а в 2014–2016 гг. сейсмогенные деформации и отклики на них концентрации U усилились с проявлением асинхронности, в которой Голоустное землетрясение повышенной силы находилось в антифазе относительно деформационных откликов концентрации U в подземной воде из зоны ГСР. В первом эпизоде сейсмогенные деформации Южно-Байкальской впадины предшествовали деформационным откликам U в воде ГСР. Роль триггера играли процессы Южно-Байкальской впадины. Второй деформационный эпизод инициировался в ГСР с поздним развитием деформаций более Южно-Байкальской впадины в виде Голоустно-Котовской линии эпицентров землетрясений, в ходе активности которой случилось Голоустное землетрясение повышенной силы. В этом случае, сейсмогенерирующие процессы были спровоцированы деформациями зоны ГСР и распространились от нее в Южно-Байкальскую впадину.



Рис. 5. Вариации концентрации U в воде ст. 14k, согласованные и несогласованные с годичной сменой паводковых и меженных режимов в 2012–2019 гг. М (Муринская) активизация, ГК (Голоустно-Котовская) линия эпицентров землетрясений (13.01.2015–29.08.2016, стадия С) и КМ (Котовско-Муринская) линия эпицентров землетрясений (14.12.2016–10.11.2017, начало стадии D) показаны по данным из работы (Rasskazov et al., 2020). Цифрами в кружках и пунктирными прямоугольниками обозначены 3 эпизода нарушения сезонных траекторий концентрации U. Красными и малиновыми эллипсами выделены, соответственно, последовательно сопряженные минимумы и максимумы концентрации U этих эпизодов.

Fig. 5. Variations in U concentration in water from station 14k, consistent and inconsistent with the annual change in flood and low-water regimes in 2012–2019. M (Murino) reactivation, ΓK (Goloustnoe-Koty) line of earthquake epicenters (01.13.2015–29.08.2016, stage C) and KM (Koty-Murino) line of earthquake epicenters (14.12.2016–10.11.2017, beginning of stage D) are shown after (Rasskazov et al., 2020). Numbers in circles and dotted rectangles indicate 3 episodes of distorted seasonal trajectories of U concentration. Red and crimson ellipses indicate successively conjugated minima and maxima, respectively, of the concentration U in these episodes.

Результаты мониторинга концентрации U и OA4/8 первого эпизода сейсмогенных деформаций

Для сопоставления с сейсмовибрационными экспериментальными данными проявления эффекта Чердынцева–Чалова наибольший интерес представляют данные, полученные для воды ст. 14k в период наблюдений с 06.09.2012 до 29.11.2016 (табл. 3). В этот период определен интервал значений OA4/8 от 1.09 до 1.24 при концентрации U = 0.12-0.96 мкг/ дм³.

Таблица З

Дата отбора	U, мкг/дм ³	OA4/8 (RSD, %)	Дата отбора	U, мкг/дм ³	OA4/8 (RSD, %)
06/09/12	0.51	1.11 (1.3)	10/11/14	0.57	1.13 (0.8)
06/10/12	0.54	1.13 (1.3)	29/11/14	0.28	1.13 (1.0)
26/10/12	0.61	1.12 (1.3)	03/01/15	0.12	1.14 (1.3)
14/11/12	0.66	1.13 (0.8)	04/03/15	0.16	1.15 (1.0)
01/12/12	0.71	1.10 (1.0)	25/04/15	0.89	1.15 (1.0)
10/01/13	0.96	1.12 (1.1)	23/06/15	0.52	1.12 (1.0)
27/01/13	0.90	1.14 (0.9)	10/10/15	0.53	1.12 (1.2)
12/06/13	0.71	1.12 (1.0)	23/10/15	0.60	1.16 (1.2)
04/07/13	0.54	1.14 (0.7)	02/12/15	0.25	1.15 (1.2)
08/09/13	0.42	1.14 (1.1)	29/04/16	0.80	1.13 (1.1)
22/11/13	0.58	1.14 (0.9)	12/06/16	0.43	1.14 (1.1)
07/12/13	0.57	1.14 (1.1)	23/06/16	0.38	1.12 (1.2)
17/01/14	0.60	1.13 (1.0)	17/09/16	0.28	1.14 (1.1)
23/02/14	0.56	1.09 (1.2)	01/10/16	0.34	1.14 (1.1)
22/03/14	0.33	1.24 (0.9)	05/10/16	0.38	1.14 (1.1)
05/04/14	0.68	1.12 (0.9)	23/10/16	0.48	1.12 (1.1)
09/05/14	0.82	1.12 (1.0)	29/10/16	0.42	1.12 (1.1)
02/06/14	0.78	1.14 (1.0)	12/11/16	0.56	1.09 (1.2)
11/07/14	0.43	1.12 (1.0)	29/11/16	0.56	1.12 (1.1)

Результаты измерений концентрации U и ОА4/8 в водных пробах станции 14k в 2012-2016 гг.

На графике временных вариаций концентраций урана в воде станции 14k (рис. 6а) демонстрируется подход к анализу откликов ОА4/8 на сейсмические активизации в Южно-Байкальской впадине подземных вод мониторинговых станций 27, 8 и 9 (Rasskazov et al., 2020). Каждая сейсмическая активизация представлена фазами a (предшествующая землетрясению), δ (проявление события на полигоне), ε (следующая за землетрясением) и ε (асейсмичная). В первую активизацию произошло последовательное возрастание концентраций урана и к началу II сейсмической активизации концентрация была на максимуме – 0.96 мкг/дм³. Перерыв в наблюдениях не позволяет судить о характере распределения U во время II сейсмической активизации. Далее последовало снижение концентраций в асейсмичную фазу и резкое падение с переходом на повышение в фазу IIIб 22 марта 2014 г. Эта фаза соответствует событию на Култукском полигоне, которое произошло 19 марта 2014 г. В асейсмичную фазу IIIг колебания концентраций урана приобрели сезонный характер.

Изотопное отношение урана в воде станции 14k оставалось стабильно низким (1.11-1.14) в асейсмичные фазы первой и второй активизации. А к началу третьей наметилось снижение с переходом к минимуму (1.09) 23 февраля 2014 г., за которым последовало возрастание изотопного параметра до значения 1.24 в фазу III б 22 марта 2014 г., то есть через 3 дня после землетрясения на Култукском полигоне. В дальнейшем, с 05 апреля 2014 г., значения изотопного параметра установились на прежнем уровне, характерном для асейсмичной фазы, и в настоящее время варьируются в пределах исходного состава $(^{234}\text{U}/^{238}\text{U} = 1.09-1.12)$. На станции отчетливо выражен сценарий подготовительной стадии со снижением ОА4/8 в фазу Ша и деформационной стадии с максимумом в фазу Шб, что указывает на проявление эффекта Чердынцева–Чалова.



Рис. 6. Временные вариации концентраций урана (*a*) и OA4/8 в воде ст. 14k (δ), сопровождавшиеся сейсмическими событиями на Култукском полигоне и на сопредельных территориях.

Fig. 6. Temporal variations in U concentrations (*a*) and AR4/8 in water from station14k (*b*), accompanied by seismic events at the Kultuk test site and adjacent areas.

Перед сильным Быстринским землетрясением (К=14.5), произошедшим вблизи Култукского полигона 21.09.2020 в зоне ГСР, наблюдались слабые отклонения концентрации U выше и ниже линии годичной смены паводковых и меженных режимов. Максимум концентрации U, обычно наблюдавшийся в середине или в конце меженного периода, оказался смещенным в начало паводкового периода. Во время Быстринского землетрясения концентрация U слегка снизилась с последующим возвращением к тренду плавных вариаций этого компонента (рис. 7). Мы видим, что вода ст. 14k была чувствительной к сейсмогенным деформациям в 2013–2014 гг., когда сейсмогенные деформации в Южно-Байкальской впадине и зоне ГСР соответствовали зеленому уровню сейсмоопасности (Rasskazov et al., 2022). В ходе развития сейсмогенных деформаций в желтом, оранжевом и красном уровнях опасности сейсмогеодинамического цикла, однако, характер гидроизотопных откликов ст. 14к на сейсмогенные деформации изменился с потерей чувствительности. На ней не проявились сейсмогенные деформации 2020 г. при подготовке и реализации сильного Быстринского землетрясения зоны ГСР. Не исключено, что можно распознать какие-то гидрогеохимические отклики ст. 14k, но они завуалированы и пока не поддаются расшифровке.

Короткий эпизод резкого снижения концентрации U определен на ст. 14k в марте 2020 г. с возвращением к высокой концентрации, характерной в целом для конца периода меженного режима. Этот короткий мартовский эпизод резкого снижения концентрации U обозначен также резким возрастанием значений OA4/8 до 1.36 (рис. 8).



Рис. 7. Вариации концентрации U в воде ст. 14k, согласованные и несогласованные с годичной сменой паводковых и меженных режимов в 2020 г., перед Быстринским землетрясением.

Fig. 7. Variations in U concentration in water from station 14k, consistent and inconsistent with seasonal change of flood and low-water regimes in 2020, before the Bystraya earthquake.



Рис. 8. Вариации ОА4/8 в воде ст. 14к в 2020 г., перед Быстринским землетрясением.

Fig. 8. Variations of the AR4/8 in water from station 14k in 2020, before the Bystraya earthquake.

Обсуждение результатов

Действие волн сжатия и релаксация при работе и остановке сейсмовибратора: гидроизотопный отклик на сейсмогенное сжатие и растяжение ст. 14k

При эксперименте с сейсмовибратором всего за 11 часов покоя после работы сейсмовибрационной установки состав изотопов U в водных пробах из скважины «Сухого Ручья» казалось бы возвращался к исходному (см. рис. 3 и 4). Однако на диаграмме ОА4/8 – А4 наблюдается систематическое смещение фигуративных точек проб, отобранных во время работы сейсмовибратора, относительно точек проб, отобранных после остановки его работы. При работе сейсмовибратора образуются компрессионные волны сжатия, способствующие закрытию микротрещин, что отражается в снижении поступления изотопа ²³⁴U из треков в подземную воду. Выключение сейсмовибратора приводит к релаксации сжимающих напряжений и, как следствие, к циркуляции подземной воды через микротрещины. Соответственно, параметры А4 и ОА4/8 возрастают относительно значений в воде при работающем сейсмовибраторе. При неоднократном включении сейсмовибратора соотношения параметров А4 и ОА4/8 усложняются (например, в пробе 4 возрастает ОА4/8), но общее разделение проб по воздействию сейсмовибратора и релаксационному механизму выдерживается (рис. 9).

На диаграмме ОА4/8 – А4 водных проб из родника станции 14k выделяется уровень преобладающих значений ОА4/8 = 1.12–1.14 при А4 от 0.30 до 1.1 единиц активности. В отличие от экспериментальных данных, в пробах не наблюдается эффекта повышения А4, хотя после сейсмического события 19.03.2014 резко возрастает ОА4/8. Аномальные составы с низким и высоким ОА4/8 находятся в диапазоне А4 рутинных проб. Снижение ОА4/8 свидетельствует о сжатии микротрещин в породах, предотвращавшем циркуляцию подземных вод, а возрастание – об их растяжении, способствовавшем их циркуляции.

Подобным разделением откликов на эффекты сжатия и растяжения характеризуется полный сейсмогеодинамический цикл, установленный в период наблюдений 2013–2022 гг. на ст. 27 Култукского полигона (Чебыкин и др., 2022; Rasskazov et al., 2022).



Рис. 9. Отклики изотопных характеристик урана в водных пробах 1–8 на работу ЦВО-100 на диаграмме OA4/8 – A4. Пробы, обозначенные красными кружками, отобраны во время работы сейсмовибратора. Красными стрелками показана тенденция роста OA4/8 и A4 в водных пробах после отключения сейсмовибратора.

Fig. 9. Responses of the isotope signatures of uranium in water samples 1–8 to the operation of the TsVO-100 in the AR4/8 vs A4 diagram. Samples marked by red circles were taken during the operation of the seismic vibrator. Red arrows show the growth trend of OA4/8 and A4 in water samples after the seismic vibrator was turned off.



Рис. 10. Диаграмма ОА4/8 – А4 водных проб из родника станции 14k за двухлетний интервал пробоотбора. Значения А4 приведены в единицах активности.

Fig. 10. Diagram OA4/8 vs A4 of water samples from the spring of station 14k for a two-year sampling interval. A4 values are presented in units of activity.

Сопоставление результатов мониторинга ст. 14k с результатами деформационного мониторинга в деформационный эпизод 2014 г.

Связь вариаций концентрации U и отношения ОА4/8 в подземных водах с деформациями пород подтверждается сравнением представленных результатов ст. 14k с результатами деформационного мониторинга в штольне «Талая» (рис. 11). Деформационный мониторинг обнаружил признаки нестабильности в Обручевском разломе после землетрясения 04.02.2014 (Муринская активизация), произошедшего вблизи него, в виде коротких разноамплитудных деформационных импульсов, сменившихся деформациями 02.03.2014, которые возросли на порядок без проявления ощутимого землетрясения. Нестабильное состояние короткими с

деформационными импульсами продолжалось и перешло 18.03.2014 в новое возрастание деформаций (приблизительно в 1.5 раза), сопровождавшееся местным землетрясением на полигоне 19.03.2014 (К=9.2) с достижением максимума 21.03.2014.

В связи с начальным проявлением коротких деформационных импульсов после землетрясения 04.02.2014 возрастала температура пород в штольне. Одна из таких температурных аномалий, обозначившаяся 18.02.2014, достигла максимума 21.02.2014. На ее нисходящей ветви проба воды, отобранная на ст. 14k 23.02.2014, показала минимальное значение ОА4/8. И наоборот, наибоглубокий температурный лее минимум 19.03.2014 соответствовал резко выраженному максимуму ОА4/8 и сопровождался землетрясением (рис. 12).



Рис. 11. Деформационные импульсы на сейсмостанции Талая в феврале-марте 2014 г. На верхней врезке показана подробная схема деформационных импульсов, предшествующих землетрясению 19.03.2014 в районе Култукского полигона. Черными кружками обозначен отбор водных проб.

Fig. 11. Deformation impulses at the Talaya seismic station in February-March 2014. The top inset shows a detailed diagram of deformation impulses preceding the March 19, 2014 earthquake in the area of the Kultuk polygon. Black circles designate water sampling.



Рис. 12. Вариации температуры горных пород в штольне Талая, зарегистрированные в первом приближении (a) и с более высоким разрешением (δ). Косыми крестиками обозначен отбор водных проб.

Fig. 12. Variations of temperature in rocks in the Talaya adit, recorded in the first approximation (*a*) and with a higher resolution (*b*). Oblique crosses designate water sampling.

Возрастание температуры в породах штольни, должно быть, имело фрикционную природу при деформации сжатия, которая способствовала также закрытию микротрещин с относительным снижением OA4/8 в подземных водах ст. 14k. Ощутимых землетрясений в фазу сжатия не произошло. Снижение температуры отразило потери тепла при растяжении. Именно фаза растяжения привела к раскрытию трещин с циркуляцией вод ст. 14k и к сейсмическому толчку 19.03.2014.

Заключение

В результате проведенных экспериментальных исследований с сейсмовибратором ЦВО-100 Бабушкинского полигона в подземной воде скважины установлено проявление эффекта Чердынцева-Чалова. Определено систематическое снижение ОА4/8 и А4 в пробах, отобранных во время работы сейсмовибратора, относительно проб, отобранных после остановки его работы. Предполагается, что при работе сейсмовибратора образуются компрессионные волны сжатия, способствующие закрытию микротрещин, что отражается в снижении поступления изотопа ²³⁴U из треков в подземную воду. Выключение сейсмовибратора приводит к релаксации сжимающих напряжений и, как следствие, к циркуляции подземной воды через микротрещины с возрастанием ОА4/8 и А4.

Мониторинг воды родника станции 14k показал, что вариации концентрации U и ОА4/8 служили в качестве чувствительных индикаторов сейсмогенных деформаций в зоне ГСР на зеленом уровне сейсмоопасности, в 2013–2014 г., по сценарию, подобному включению и выключению сейсмовибратора. В это время деформационные импульсы поступали в зону ГСР от Среднего Байкала. В ходе развития сейсмогенных деформаций в желтом, оранжевом и красном уровнях опасности сейсмогеодинамического цикла, однако, характер гидроизотопных откликов ст. 14к на сейсмогенные деформации изменился с потерей чувствительности. Ст. 14k находится в зоне ГСР и отражает сейсмогенерирующие процессы этой зоны. Полный сейсмогеодинамический цикл проявился в вариациях ОА4/8 и А4 ст. 27 Култукского полигона, расположенной в сочленении ГСР и Обручевского разломов. Пример ст. 14k показывает, что для успешного прогноза сильного землетрясения мониторинговое наблюдение одной станции недостаточно. Необходимо поддерживать гидрогеохимический мониторинг нескольких станций, расположенных на полигоне в разных структурных условиях и поэтому несущих разнородную информацию о меняющихся во времени сейсмогенных деформациях.

Благодарности

Состав воды анализировался на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500се в ЦКП «Ультрамикроанализ» (ЛИН СО РАН, г. Иркутск).

Литература

Добрынина А.А., Саньков В.А. Направления вспарывания в очагах землетрясений как показатель распространения деструктивного процесса (на примере Байкальской рифтовой системы) // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского пояса (от океана к континенту). Вып. 6, т. 1. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2008. С. 110–112.

Карта эпицентров землетрясений. Иркутск: Байкальский Филиал Геофизической Службы, 2022. http://www.seis-bykl.ru.

Киселев Г.П., Зыков С.Б. Исследования эффекта Чердынцева–Чалова. Проблемы и перспективы // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека. Материалы IV Международной конференции, г. Томск, 4–8 июня 2013 г. С. 275–278.

Мельникова В.И., Гилева Н.А., Арефьев С.С., Быкова В.В., Масальский О.К. Култукское землетрясение 2008 г. с Мw = 6.3 на юге Байкала: Пространственно-временной анализ сейсмической активизации // Физика Земли. 2012. № 11. С. 44–62.

Рассказов С.В., Ильясова А.М., Чувашова И.С., Борняков С.А., Оргильянов А.И., Коваленко С.Н., Семинский А.К., Попов Е.П., Чебыкин Е.П. Гидрогеохимическая зональность изотопов урана (²³⁴U/²³⁸U) на юге Сибирского палеоконтинента: роль резервуара Южного Байкала в формировании подземных вод // Геодинамика и тектонофизика. 2020. Т. 11, № 3. С. 632–650. https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-3-0496.

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 (²³⁴U/²³⁸U) и ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr в подземных водах из активных разломов западного побережья Байкала // Геодинамика и тектонофизика. 2015. Т. 6, № 4. С. 519–553. Рассказов С.В., Чебыкин Е.П., Ильясова А.М., Тубанов Ц.А., Герман Е.И., Бартанова С.В., Борняков С.А., Чувашова И.С. Тестирование эффекта Чердынцева–Чалова с использованием сейсмовибратора на Бабушкинском полигоне и результаты мониторинга отношений активностей ²³⁴U/²³⁸U в подземных водах для прогноза землетрясений в Южно-Байкальской впадине // V Всероссийская научнопрактическая конференция Геодинамика и минерагения Северной и Центральной Азии, 27–31 августа. Улан-Удэ, 2018. С. 308–310.

Ружич В.В. Сейсмотектоническая деструкция в коре Байкальской рифтовой зоны. Изд-во Наука, Сибирское отделение, Новосибирск, 1997. 144 с.

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. DOI:10.5800/GT-2018-9-1-0343.

Солоненко В.П., Николаев В.В., Семенов Р.М., Демьянович М.Г., Курушин Р.А., Хромовских В.С., Чипизубов А.В. Геология и сейсмичность зоны БАМ. Сейсмогеология и сейсмическое районирование. Новосибирск: Наука, 1985. 207 с.

Тимофеев В.Ю., Калиш Е.Н., Стусь Ю.Ф., Ардюков Д.Г., Арнаутов Г.П., Смирнов М.Г., Тимофеев А.В., Носов Д.А., Сизиков И.С., Бойко Е.В., Грибанова Е.И. Вариации силы тяжести и современная геодинамика юго-западной части Байкальского региона // Geodynamics & Tectonophysics. 2013. V. 4, No. 2. P. 135–168. doi:10.5800/GT2013420094.

Тимашев С.Ф. О природе эффекта Чердынцева–Чалова // Журнал физической химии. 2018. Т. 92, № 6. С. 883–887. DOI: 10.7868/S0044453718060043.

Шерман С.И., Лысак С.В., Горбунова Е.А. Тектонофизическая модель байкальской сейсмической зоны, ее тестирование и возможности среднесрочного прогноза землетрясений. Геология и геофизика, 2012, Т. 53, № 4. С. 508–526.

Чебыкин Е.П., Гольдберг Е.Л., Куликова Н.С., Жученко Н.А., Степанова О.Г., Малопевная Ю.А. Метод определения изотопного состава аутигенного урана в донных отложениях озера Байкал // Геология и геофизика. 2007. Т. 48, № 6. С. 604–616.

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 ²³⁴U/²³⁸U в водах из активных разломов западного побережья Южного Байкала // Доклады академии наук. 2015. Т. 460, № 4. С. 464–467.

Чердынцев В.В. Уран–234 // М.: Атомиздат, 1969. 308 с.

Чердынцев В.В. Ядерная вулканология // М.: Наука, 1973. 208 с.

Чалов П.И. Изотопное фракционирование природного урана // Фрунзе: Илим, 1975. 236 с.

Шерман С.И. Сейсмические процессы и прогноз землетрясений: тектонофизическая концепция. Новосибирск: Академическое издательство «Гео», 2014. 359 с.

Яковлев Е.Ю., Киселёв Г.П., Дружинин С.В., Зыков С.Б. Исследование фракционирования изотопов урана (²³⁴U, ²³⁸U) в процессе образования кристаллов льда // Вестн. Сев. (Арктич.) федер. ун-та. Сер.: Естеств. науки. 2016. № 3. С. 15–23. doi: 10.17238/issn2227-6572.2016.3.15.

Bornyakov S.A., Miroshnichenko A.I., Salko D. Diagnostics of pre-seismogenic state of heterogeneous environments according to the deformation monitoring // Doklady Earth Sciences 2015. V. 468, No. 1. P. 84–87.

Bornyakov S.A., Ma J., Miroshnichenko A.I., Guo Y., Salko D.V., Zuev F.L. Diagnostics of meta-instable state of seismically active fault // Geodynamics & Tectonophysics. 2017. V. 8, No. 4. P. 989–998. doi:10.5800/GT-2017-8-4-0328.

Kovalevsky V.V., Sobisevich A.L., Tubanov Ts.A., Braginskaya L.P., Grigoryuk A.P. Vibroseismic Investigations of the Baikal Rift Zone with a Powerful CVO-100 Vibrator. Geodynamics & Tectonophysics. 2022. V. 13, No. 2. P. 0589. doi:10.5800/GT-2022-13-2-0589. Rasskazov S., Ilyasova A., Bornyakov S., Chuvashova I., Chebykin E. Responses of a 234 U/ 238 U activity ratio in groundwater to earthquakes in the South Baikal Basin, Siberia // Front. Earth Sci. 2020. V. 14 (4): 711–737; doi.org/10.1007/s11707-020-0821-5.

Sherman S.I. A tectonophysical model of a seismic zone: experience of development based on the example of the Baikal rift system. Izvestiya, Physics of the Solid Earthю 2009. V.

45, No. 11. P. 938–941. http://dx.doi.org/10.1134/S1069351309110020.

Sherman S.I. Deformation waves as a trigger mechanism of seismic activity in seismic zones of the continental lithosphere // Geodynamics & Tectonophysics. 2013. V. 4, No. 2. P. 83–117. doi:10.5800/GT-2013-4-2-0093.

Ильясова Айгуль Маратовна,

кандидат геолого-минералогических наук, ведущий инженер, 664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128, Институт земной коры СО РАН, email: ila@crust.irk.ru. **Ilyasova Aigul Maratovna,** candidate of geological and mineralogical sciences, leading engineer, 664033 Irkutsk, st. Lermontova, d. 128, Institute of the Earth's Crust SB RAS, email: ila@crust.irk.ru.

Рассказов Сергей Васильевич,

доктор геолого-минералогических наук, профессор, 664003 Иркутск, ул. Ленина, д. 3, Иркутский государственный университет, геологический факультет, заведующий кафедрой динамической геологии. 664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128, Институт земной коры СО РАН, заведующий лабораторией изотопии и геохронологии, тел.: (3952) 51-16-59, email: rassk@crust.irk.ru. Rasskazov Sergei Vasilievich, doctor of geological and mineralogical sciences, professor, 664003 Irkutsk, st. Lenina, 3, Irkutsk State University, Faculty of Geology, Head of Dynamic Geology Char, 664033 Irkutsk, st. Lermontova, 128, Institute of the Earth's Crust SB RAS, Head of the Laboratory for Isotopic and Geochronological Studies, tel.: (3952) 51-16-59, email: rassk@crust.irk.ru.

Чебыкин Евгений Павлович,

кандидат химических наук, старший научный сотрудник, 664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128, Институт земной коры СО РАН, 664033 Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3, Лимнологический институт СО РАН, email: epcheb@yandex.ru. **Chebykin Evgeny Pavlovich,** Candidate of Chemical Sciences, Senior Researcher, 664033 Irkutsk, st. Lermontova, d. 128, Institute of the Earth's Crust SB RAS, 664033 Irkutsk, st. Ulan-Batorskaya, 3, Limnological Institute SB RAS, email: epcheb@yandex.ru.

Борняков Сергей Александрович,

кандидат геолого-минералогических наук, 664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128, Институт земной коры СО РАН, старший научный сотрудник, email: bonyak@crust.irk.ru. **Bornyakov Sergey Alexandrovich,** candidate of geological and mineralogical sciences, 664033 Irkutsk, st. Lermontova, 128, Institute of the Earth's Crust SB RAS, Senior Researcher, email: bonyak@crust.irk.ru.

Снопков Сергей Викторович

кандидат геолого-минералогических наук, доцент, 664003 Иркутск, ул. Ленина, д. 3, Иркутский государственный университет, геологический факультет, email: snopkov_serg@mail.ru. **Snopkov Sergey Viktorovich,** Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Associate Professor, 664003 Irkutsk, st. Lenina, 3, Irkutsk State University, Faculty of Geology, email: snopkov_serg@mail.ru.

Чувашова Ирина Сергеевна,

кандидат геолого-минералогических наук, 664003 Иркутск, ул. Ленина, д. 3, Иркутский государственный университет, геологический факультет, доцент, 664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128, Институт земной коры СО РАН, стариий научный сотрудник, тел.: (3952) 51–16–59, email: chuvashova@crust.irk.ru. **Chuvashova Irina Sergeevna,** candidate of geological and mineralogical sciences, 664003 Irkutsk, st. Lenina, 3,

Irkutsk, state University, Faculty of Geology, assistant professor, 664033 Irkutsk, st. Lermontova, 128, Institute of the Earth's Crust SB RAS, Senior Researcher, tel.: (3952) 51–16–59, email: chuvashova@crust.irk.ru.

Тубанов Цырен Алексеевич,

кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник 670047 г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, ба, Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, email: geos@ginst.ru. **Tubanov Tsyren Alekseevich,** candidate of geological and mineralogical sciences, leading researcher, 670047 Ulan-Ude, 6a Sakhyanova str, N.L. Dobretsov Geological Institute SB RAS, email: geos@ginst.ru.

Герман Евгений Иванович,

инженер, 670047 г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, ба, Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, email: Net-admin@list.ru. **German Evgeny Ivanovich,** engineer, 670047 Ulan-Ude, 6a Sakhyanova str, N.L. Dobretsov Geological Institute SB RAS, email: Net-admin@list.ru.

Бартанова Светлана Викторовна,

инженер, 670047 г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, ба, Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, email: bartanova@list.ru. **Bartanova Svetlana Victorovna,** engineer, 670047 Ulan-Ude, 6a Sakhyanova str, N.L. Dobretsov Geological Institute SB RAS, email: bartanova@list.ru.