

УДК 550.4+502.175+550.(343.3+348.098)

ПОВЫШЕННЫЕ СОДЕРЖАНИЯ РТУТИ В ВОДЕ ИСТОКА РЕКИ АНГАРА: ОТКЛИКИ НА ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ И СИЛЬНЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

© 2020 г. В. И. Гребенщикова^{1,*}, академик РАН М. И. Кузьмин¹, А. В. Ключевский², В. М. Демьянович², А. А. Ключевская²

Поступило 01.10.2019 г.

После доработки 06.02.2020 г.

Принято к публикации 07.02.2020 г.

Содержания ртути в воде истока р. Ангара (сток оз. Байкал) сопоставлены с распределением во времени землетрясений различных магнитуд, произошедших на разном удалении от пункта отбора воды. Установлено, что всем значимым максимумам содержания ртути в воде предшествуют сильные геодинамические воздействия в Байкальской рифтовой зоне. Прогнозные оценки тренда среднегодового содержания ртути указывают на возможность значительного повышения ее концентрации в локальных областях флюидной разрядки разломов при мощном геодинамическом воздействии. Предполагается, что раскрытие глубинных разломов при сильных подвижках приводит к декомпрессии с дегазацией ртути и быстрым ее подъемом на поверхность по зонам разломов.

Ключевые слова: ртуть, вода, исток Ангары, Байкальская рифтовая зона, геодинамические подвижки, землетрясения

DOI: 10.31857/S2686739720040076

Байкальская рифтовая зона (БРЗ) протягивается из западной Монголии вдоль оз. Байкал к южной Якутии и выделяется повышенным уровнем сейсмичности [1]. По данным о сейсмических источниках установлены пространственная неоднородность и временная неустойчивость напряженно-деформированного состояния литосферы БРЗ, обусловленные наличием трех структур-аттракторов рифтогенеза (САР) – областей с максимальной деформационно-прочностной анизотропией геолого-геофизической среды [2]. Эти особенности формируются структурой и вещественными свойствами горных пород и флюидов, расположением САР и проявляются в периодических импульсных перестройках напряжений, которые приводят к синхронизации скорости сейсмического потока и реализации парных сильных землетрясений [3–5]. Средняя мощность земной коры БРЗ составляет около 45 км, но под Байкалом ее толщина уменьшается до 36 км [6], а Южно-Байкальская впадина выделяется резким уменьшением мощности коры и большим количеством

разломов. Максимальная раздробленность фундамента разломами установлена под этой впадиной [7], являющейся “историческим ядром” [1] и древнейшей САР [2] Байкальской рифтовой системы. Именно в этом районе с 1997 г. Институт геохимии СО РАН проводит основные мониторинговые исследования химического состава воды в оз. Байкал.

К настоящему времени собрана аналитическая информация примерно по 500 пробам воды Байкальской водной экосистемы. Особый интерес представляет исследование содержания ртути в воде истока Ангары, что связано как с ее специфическими химическими свойствами и высокой биоактивностью, так и с возможностью поступления ртути из разломов Байкальского рифта [8, 9]. Измерение содержания ртути в поверхностной и глубинной воде Байкала, истока р. Ангара и некоторых притоков проводится атомно-абсорбционным методом с беспламенным определением паров восстановленной атомарной ртути на приборе РА-915+ с приставкой РП-91 [9]. Контроль точности измерений прибора осуществлялся путем ежегодного тестирования и регулировки прибора предприятием изготовителем (ЛЮМЭКС, Санкт-Петербург). Химический анализ воды выполнен на оборудовании аккредитованного ЦКП “Изотопно-геохимических исследований” Ин-

¹ Институт геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

² Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

*E-mail: vgreb@igc.irk.ru

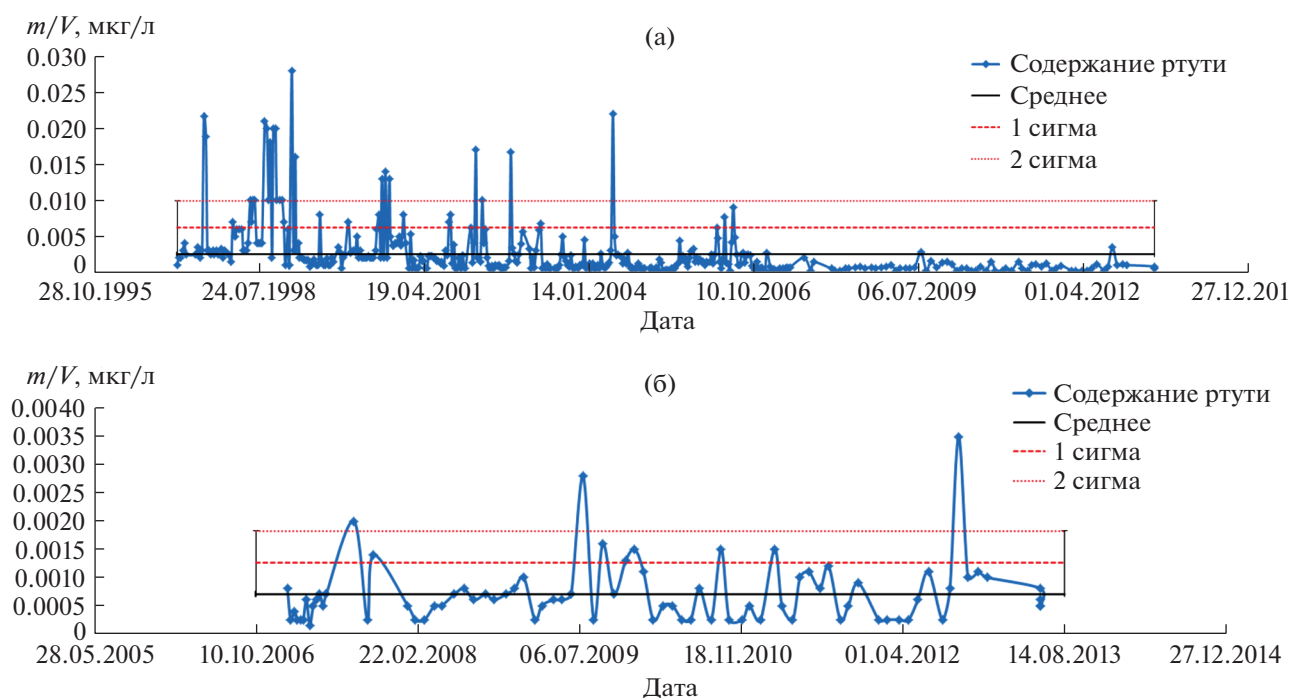


Рис. 1. Графики изменения во времени содержания ртути в воде истока р. Ангара и статистические оценки вариаций. а – за период наблюдений 1997–2013 гг., б – за период наблюдений 2007–2013 гг.

ститута геохимии СО РАН (аналитики Л.Д. Андрулайтис, О.С. Рязанцева).

В сообщении представлены основные результаты определения и анализа содержания ртути в воде истока р. Ангара. В этом месте с 1997 по 2006 гг. отбор проб и анализ воды осуществлялся подекадно, а с 2006 по 2019 гг. – ежемесячно. На графиках вариаций во времени содержания ртути видно, что самые значительные максимумы и повышенный разброс данных наблюдаются в 1997–2000 гг. (рис. 1а). В период 2001–2006 гг. волатильность данных постепенно уменьшается, и имеются отдельные максимумы содержания ртути в 2002, 2004 и 2006 гг. С 2007 г. наблюдается низкий уровень содержания ртути в воде, разброс данных минимален и на общем квазистационарном фоне видны небольшие максимумы в 2007, 2009 и 2012 гг. (рис. 1 б). Для оценки значимости указанных максимумов определено среднее значение содержания ртути и его стандартное отклонение за полный период времени 1997–2013 гг. и за квазистационарный период 2007–2013 гг. Среднее содержание ртути по общей выборке данных 1997–2013 гг. равно 0.0025 мкг/л при стандартном отклонении $\sigma = 0.0037$ мкг/л. Эти оценки позволяют детерминировать линией “2 сигма” на рис. 1, а отдельные максимумы и группы максимумов концентрации ртути на уровне значимости не ниже 0.05 в период 1997–2006 гг. Среднее содержание ртути по выборке данных 2007–2013 гг. равно 0.0007 мкг/л при стандартном отклонении

$\sigma = 0.0006$ мкг/л, что позволяет детерминировать линией “2 сигма” на рис. 1б в 2007, 2009 и 2013 гг. максимумы концентрации ртути на уровне значимости не ниже 0.05.

Максимальный уровень и повышенная волатильность содержания ртути в 1997–2000 гг. совпадают с активизацией Южно-Байкальской САР в конце 1990-х годов и произошедшим на расстоянии 26 км от пункта отбора воды сильным Южно-Байкальским землетрясением (25.02.1999; энергетический класс $K_p = 14.6$; моментная магнитуда $M_w = 6.0$) [2, 8]. Эти факторы послужили главной мотивацией настоящей работы, в которой выполнено сопоставление времени активизации САР и реализации сильных землетрясений со значимыми максимумами содержания ртути в воде истока р. Ангара. Известно [10–12], что сильные геодинамические воздействия на метастабильную разломно-блочную литосферу Байкальского рифта могут приводить к кратковременному раскрытию локальных участков шовной зоны глубинных разломов между Сибирской платформой и Амурской плитой и вызывать изменения флюидного режима. Шовные межплитные границы имеют каналы повышенной флюидопроводности, которые способны дренировать “аномальную” низкоскоростную мантию, имеющую флюидную природу [13]. Флюидизация верхних частей мантии способствует их плавлению с приращением объема, чему содействует также снижение всесторон-

него давления при раскрытии локальных участков зоны краевого шва. Это, в свою очередь, приводит к активизациям САР, инверсиям осей напряжений в литосфере БРЗ, реализации сильных землетрясений и возможному вскипанию и дегазации ртути с быстрым подъемом на поверхность по зонам раскрытых разломов.

При проверке возможной связи повышенного содержания ртути в воде с динамическим воздействием от сильных землетрясений были приняты во внимание сейсмические события различных магнитуд, произошедшие с 1997 по 2013 гг. на удалении r от истока р. Ангара. В анализе были рассмотрены:

Катастрофические землетрясения мира с $M \geq 8$. Используются три самые близкие внутриконтинентальные землетрясения, произошедшие в Китае [14]:

1. 2001–11–14, $M = 8$, $\varphi = 35.93^\circ$ с.ш., $\lambda = 90.59^\circ$ в.д., $r \approx 2150$ км;
2. 2008–03–20, $M = 8$, $\varphi = 35.55^\circ$ с.ш., $\lambda = 81.51^\circ$ в.д., $r \approx 2650$ км;
3. 2008–05–12, $M = 8$, $\varphi = 31.06^\circ$ с.ш., $\lambda = 103.37^\circ$ в.д., $r \approx 2300$ км.

Сильнейшие землетрясения с $M \geq 7$ в радиусе 3000 км от истока р. Ангара. Используются пять самых близких внутриконтинентальных землетрясений [14]:

1. Чуйское, с $M = 7.4$ ($\varphi = 50.01^\circ$ с.ш., $\lambda = 87.78^\circ$ в.д., $r \approx 1220$ км к западу) и два его мощных афтершока с $M = 7.0$ (27.09.2003–01.12.2003);
2. Култукское, 2008–08–27, $M = 7.0$, $\varphi = 51.66^\circ$ с.ш., $\lambda = 104.14^\circ$ в.д., $r \approx 60$ км;
3. Тувинское, 2012–02–26, $M = 7.0$, $\varphi = 51.80^\circ$ с.ш., $\lambda = 95.98^\circ$ в.д., $r \approx 610$ км.

Сильные землетрясения Байкальского региона ($\varphi = 48^\circ$ – 60° с.ш., $\lambda = 96^\circ$ – 122° в.д.) с $K_p \geq 13$ ($M \geq 5$). В выборке сильных землетрясений Байкальского региона с $K_p \geq 13$ представлено 58 событий [15], из них с $K_p \geq 14$ –19 толчков, с $K_p \geq 15$ –4 землетрясения. Почти все землетрясения произошли в рифтовой зоне, более половины – в пределах и обрамлении рифта оз. Байкал.

Представительные землетрясения с $K_p \geq 9$ ($M \geq 3$) в окрестностях истока р. Ангара. Используются землетрясения, произошедшие в площадке $1^\circ \times 1.8^\circ$ ($\varphi = 51.3^\circ$ – 52.3° с.ш., $\lambda = 103.9^\circ$ – 105.7° в.д., число толчков $N = 342$) [15].

Все зарегистрированные толчки с $K_p \geq 6$ ($M \geq 1.5$) в окрестностях истока р. Ангара. Используются толчки в площадке $0.3^\circ \times 0.4^\circ$ ($\varphi = 51.7^\circ$ – 52.0° с.ш., $\lambda = 104.6^\circ$ – 105.0° в.д., $N = 468$).

Обобщение полученных результатов представлено на рис. 2, на котором видно, что всем значимым максимумам содержания ртути в воде предшествуют сильные геодинамические воздействия.

В период 1997–1998 гг. основное воздействие оказывает Южно-Байкальская САР, которая находится в фазе максимальной геодинамической активности в это время. Совместное влияние САР и Южно-Байкальского землетрясения 1999 г. проявляется в серии повышенных значений содержания ртути в 1999–2000 гг. Постепенное ослабление геодинамической активности САР с 2001 г. прослеживается в уменьшении уровня среднего содержания ртути в воде (рис. 3) и отдельные значимые максимумы 2002 и 2004 гг. можно связать с удаленным катастрофическим землетрясением 14.11.2001, $M = 8$ и Чуйскими толчками 2003 г. Менее значительные максимумы в феврале–мае 2006 г. могут быть обусловлены сильными землетрясениями БРЗ (ноябрь–декабрь 2005 г.) на фоне дальнейшего ослабления активности САР. В последующие годы влияние САР минимально, содержание ртути в воде стабилизируется на уровне фона с редкими отдельными максимумами, которые можно соотносить с воздействием удаленных катастрофических землетрясений 2008 г. с $M = 8$, а также с сильнейшим Култукским землетрясением и толчком 21.06.2009, произошедшими в БРЗ. Последнее значимое повышение содержания ртути в 2012 г. соотносится с сильным Тувинским землетрясением 2012 г. Связь слабых близких толчков с вариациями содержания ртути достоверно не выявлена.

График среднего по годам содержания ртути имеет понижающийся во времени тренд (рис. 3). Величина стандартного отклонения изменяется от 0.0059 до 0.00014 мкг/л, что указывает на кардинальное различие динамики процесса в начале (сильные флуктуации, процесс неустойчив) и в конце мониторинга (слабые флуктуации, процесс квазистационарен). Осредненные данные аппроксимируются степенной зависимостью, и при показателе степени (-0.82) имеют высокий коэффициент корреляции $\rho \approx 0.84$. При экстраполяции графика в сторону уменьшения временного периода происходит рост уровня содержания ртути: на временном интервале месяц и полмесяца прогнозные значения содержания ртути составляют около 0.36 и 0.64 мкг/л, что значительно превышает предельно допустимую концентрацию водоемов рыбохозяйственного использования (0.01 мкг/л) и питьевой воды (0.5 мкг/л). Полученные прогнозные оценки отличаются от реальных замеров 1997–2013 гг., в которых содержание ртути не превышает 0.028 мкг/л. Однако эти оценки указывают на то, что при мощном геодинамическом воздействии концентрация ртути может кратковременно значительно повышаться в локальной области флюидной разрядки разлома. При аномально высоком содержании ртути обитающие в этих местах рыба и нерпа могут быть отравлены. Возможно, что такое явление соответствует действительности, и в

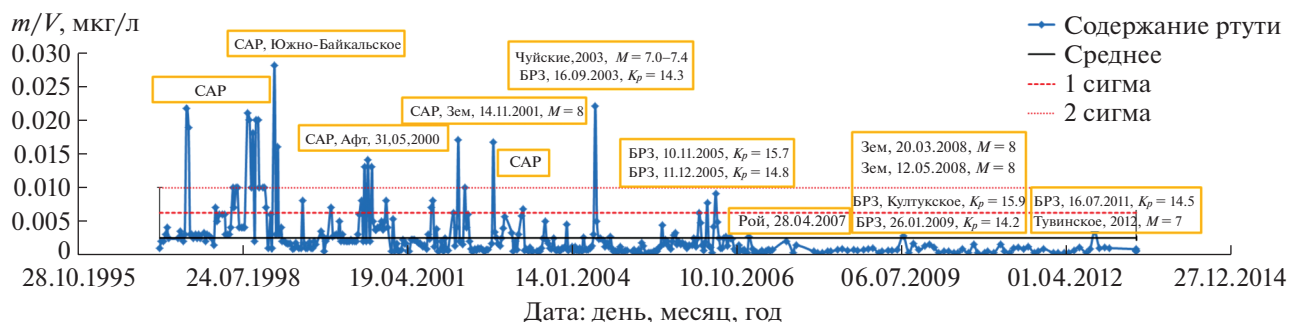


Рис. 2. Возможные источники геодинамических воздействий, сформировавших значимые максимумы содержания ртути в воде истока р. Ангара.

прессе описаны случаи массовой гибели нерпы и рыбы в отдельных местах Южно-Байкальской впадины. Попадая в живые организмы, ртуть превращается в метилртуть CH_3Hg^+ , яд, который вызывает необратимые процессы. При отравлениях этим ядом отмечаются признаки одновременного поражения центральной нервной системы, сердечно-сосудистой системы, печени и почек.

Таким образом, результаты определения содержания ртути в воде истока р. Ангара сопоставлены с распределением во времени землетрясений различных магнитуд, произошедших на разном удалении от пункта отбора воды — истока реки Ангары, единственного стока Байкала. Установлено, что все значимые максимумы содержания ртути в воде являются откликами на сильные геодинамические воздействия. Прогнозные оценки тренда среднегодового содержания ртути указывают на возможность существенного повышения концентрации ртути в локальной области флюидной разрядки разлома при мощном геодинамическом воздействии. В качестве меха-

низма реализации предположено, что раскрытие локальных областей глубинных разломов при сильном геодинамическом воздействии приводит к декомпрессии со вскипанием, дегазацией ртути и быстрым подъемом на поверхность по зонам раскрытых разломов. Проведенные исследования показали, что состояние и сохранение воды Байкальской водной экосистемы зависит и от природных катаклизмов. В связи с этим необходимо продолжение постоянных геохимических и геодинамических исследований в мониторинговом режиме.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнялась при поддержке гранта РФФИофи_м №17–29–05022, проектов НИР (0350–2016–0027, 0346–2019–0001) и частичной финансовой поддержке РФФИ (17-57-44006, 14–45–04011_р_Сибирь_a).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Логачев Н.А. // Геология и геофизика. 2003. Т. 44 (5). С. 91–106.
2. Klyuchevskii A.V. // J. Asian Earth Sci. 2014. V. 88. P. 246–256.
3. Klyuchevskii A.V. // J. Geodyn. 2010. V. 49. № 1. P. 19–23.
4. Ключевский А.В., Ключевская А.А. // ДАН. 2009. Т. 425. № 2. С. 240–244.
5. Klyuchevskii A.V., Khlebopros R.G. // Geosci. Front. 2013. V. 6. № 4. P. 709–716.
6. Недра Байкала (по сейсмическим данным). Новосибирск: Наука. 1981. 105 с.
7. Ключевский А.В., Демьянович В.М. // ДАН. 2002. Т. 382. № 6. С. 816–820.

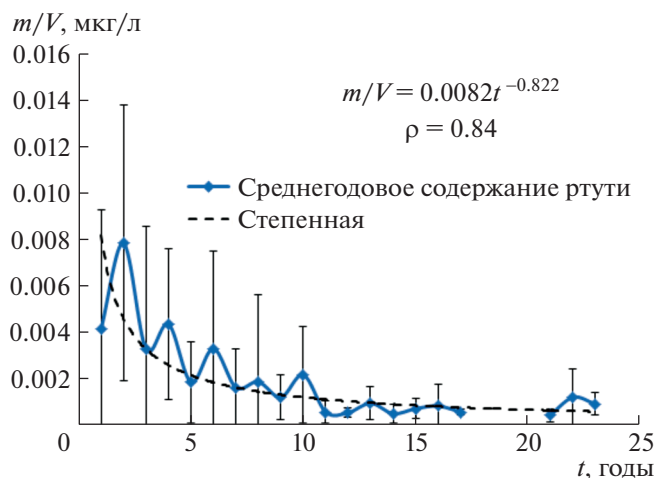


Рис. 3. График и тренд среднегодового содержания ртути в воде истока р. Ангара.

8. Коваль П.В., Удодов Ю.Н., Андрулайтис Л.Д., Саньков В.А., Гапов А.Е. // ДАН. 2003. Т. 389. № 2. С. 235–238.
9. Гребенщикова В.И., Кузьмин М.И., Пройдакова О.А., Зарубина О.В. // ДАН. 2018. Т. 480. № 4. С. 449–454.
10. Летников Ф.А., Дорогокупец П.И., Савельева В.Б., Вилор Н.В., Лашкевич В.В., Медведев В.Я., Иванова Л.И., Большев С.О., Меньшагин Ю.В., Медведева Т.И., Гантимурова Т.П., Сизых Н.В., Данилов Б.С., Аникина Ю.В., Менакер И.Г., Петрова Е.В. Флюидный режим и геознергетика континентальной литосферы // Литосфера Центральной Азии. Новосибирск: Наука. 1996. С. 30–42.
11. Ключевский А.В. // ДАН. 2001. Т. 381. № 2. С. 251–254.
12. Летников Ф.А., Ключевский А.В. // ДАН. 2014. Т. 458. № 1. С. 52–56.
13. Артюшков Е.В., Летников Ф.А., Ружич В.В. О разработке нового механизма формирования Байкальской впадины // Геодинамика внутриконтинентальных горных областей. Новосибирск: Наука. 1990. С. 367–376.
14. <http://www.isc.ac.uk> Internatl. Seismol.Cent., Thatcher, UnitedKingdom, 2019
15. <http://www.seis-bykl.ru> Байкальский филиал Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба Российской академии наук”

ELEVATED MERCURY IN THE WATER SOURCE OF THE ANGARA RIVER: RESPONSE TO GEODYNAMIC IMPACTS AND SEVERE EARTHQUAKES

V. I. Grebenschikova^{a,#}, Academician of the RAS M. I. Kuzmin^a, A. V. Klyuchevskii^b,
V. M. Demyanovich^b, and A. A. Kluchevskaya^b

^a Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation

^b Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation

[#]E-mail: vgreb@igc.irk.ru

Mercury concentrations in water source of the Angara River (runoff of Lake Baikal) are compared with temporal variations of earthquakes of various magnitude ranges taking place at different distances from the water-sampling site. The significant mercury maxima appear to be preceded by strong geodynamic effects within the Baikal Rift zone. The estimates of average annual mercury contents indicate possible significant increase in mercury levels in local areas of fluid discharge of faults under strong geodynamic effects. The opening of deep faults during strong movements is suggested to lead to decompression with mercury degassing and its rapid rise to the surface along the fault zones

Keywords: mercury, water, the Angara River source, Baikal Rift Zone, geodynamic movements, earthquakes