ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. НАУКИ О ЗЕМЛЕ, 2021, том 496, № 1, с. 30–35

ГЕОХИМИЯ

УДК 551.243.12:550.47:546.49:630.551/.553(282.256.341)

ЭМАНАЦИИ РТУТИ БАЙКАЛЬСКОГО РИФТА ПО ДАННЫМ ИЗУЧЕНИЯ ГОДОВЫХ КОЛЕЦ ДЕРЕВЬЕВ (НА ПРИМЕРЕ ТУНКИНСКОЙ ВПАДИНЫ)

© 2021 г. Л. П. Рихванов[1], Е. Е. Ляпина[2,*], Д. В. Юсупов[1,3,**], Е. М. Турсуналиева[1], А. А. Павлова[1]

Представлено академиком РАН В.Г. Моисеенко 01.10.2020 г.
Поступило 01.10.2020 г.
После доработки 28.10.2020 г.
Принято к публикации 28.10.2020 г.

Рассматривается феномен естественной дегазации ртути в Байкальской рифтовой зоне по данным изучения годовых колец тополя (*Populus suaveolens* Fisch.) и сосны (*Pinus sylvestris* L.). Пробы керна деревьев отобраны в Тункинской впадине в июле 2018 г. с помощью бурава. Выделение границ годовых колец выполняли на приборе LINTAB с программным обеспечением TSAP-Win и Lignovision. Анализ Hg проводили на ртутном анализаторе “РА-915М” методом пиролиза. Прослежена динамика изменения концентрации Hg по годовым кольцам тополя и сосны в Тункинской впадине с 1940 по 2018 г. Среднее содержание Hg во всех исследованных древесных кернах составило 7 нг/г, максимальное – 1089 нг/г. Повышенные содержания Hg приурочены к разрывным нарушениям как субширотного, так и северо-западного простирания. Максимальная концентрация Hg выявлена в кернах сосны и тополя на участке пересечения крупных тектонических разломов. Прослежена связь между пиками высоких концентраций Hg в древесине и периодами сильных землетрясений с магнитудой более 4.0. Полученные данные могут выступать палеоиндикаторами деформаций земной коры, фиксируя как отдельные процессы кратковременного сброса тектонических напряжений, так и сами землетрясения.

Ключевые слова: ртуть, Байкальская рифтовая зона, дендрогеохимия, тополь, сосна, землетрясение

DOI: 10.31857/S2686739721010199

ВВЕДЕНИЕ

Байкальская рифтовая зона (далее БРЗ) – внутриконтинентальная тектоническая структура глубинного заложения, которую трассирует система рифтовых впадин: Тункинская, Баргузинская, Байкальская, Чарская и др. [1], выполненных мезозойско-кайнозойскими отложениями.

В пределах Тункинской структуры выделяются локальные впадины – Быстринская, Торская, Тункинская, Хойтогольская, Мондинская, разделенные внутривпадинными поднятиями, которые ограничены разрывными нарушениями различной ориентировки [1].

Образование БРЗ обусловлено существованием мантийных плюмов [2], а также положением древних структурных неоднородностей литосферы, согласно ориентированным по отношению к сжатию литосферы в результате коллизии Евразии и Индостана [3].

Эмиссии Hg в поровом воздухе в разломных зонах БРЗ повышены [6], вследствие чего концентрации Hg, а также Rn и Tn в почвах также выше вне зависимости от типа и генезиса по сравнению с почвами за пределами тектонически активных зон. Исследованиями [4, 5] в БРЗ также

[1] *Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия*
[2] *Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Россия*
[3] *Амурский государственный университет, Благовещенск, Россия*
**E-mail: eeldv@mail.ru*
***E-mail: yusupovd@mail.ru*

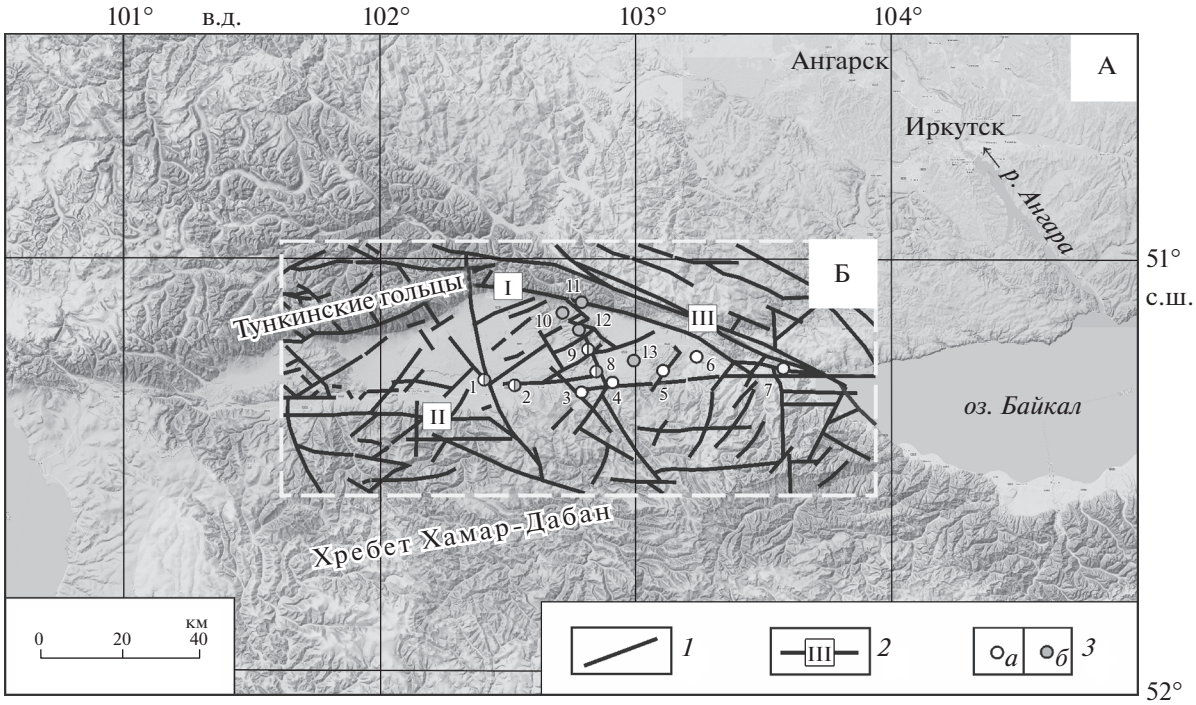

Рис. 1. Тункинская рифтовая впадина и ее горное обрамление на трехмерной модели рельефа (А) с разломно-блоковым строением земной коры [2] (Б): *1* – разрывные нарушения; *2* – главные разломы: I – Тункинский, II – Южно-Тункинский, III – Главный Саянский; *3* – точки отбора проб (а) – тополя, (б) – сосны; № проб: 1 – Шимки, 2 – Кырен, 3 – Жемчуг, 4 – Зактуй, 5 – Зун-Мурино, 6 – Торы, 7 – Быстрая, 8 – Тунка, 9 – Галбай, 10 – Аршан, 11 – Дацан, 12 – Хурай-Хобок, 13 – Еловка.

установлены тепловые и геохимические потоки As, Tl, Ge, Mo, Ag, Hg и Rn.

На исследованной территории фиксируется гидротермальная деятельность в виде источников различного состава: метановых, углекислых и др. с температурой на выходе от 30 до 74°C, сопровождающаяся образованием травертинов, с которыми связано формирование Au–Ag-, Se–Mo–U-минерализации [7].

Современная внутриконтинентальная рудообразующая система БРЗ – практически аналог рудообразующих систем дна Мирового океана. [8].

Сейсмичность Тункинской впадины связана с активностью Тункинского разлома (рис. 1). С середины XX века зарегистрировано 23 землетрясения с магнитудой более 4, в том числе в 1950 г. (M_{LH} = 7.0), 1958 г. (Ms = 5), 1973 г. (Ms = 4.5), 1981 г. (Ms = 5), 1995 г. (Ms = 5.9), 2008 г. (Ms = 6.3), а событий с меньшими энергиями насчитывается около 3000 в год [9].

Каждая “горячая” флюидогенная система сопровождается ореолом Hg [10], которая накапливается растительностью, в том числе в годовых кольцах деревьев. Метод дендрогеохимии, широко используемый в решении практических задач геохимии, радиоэкологии, экологии и др., позволяет оценивать изменение геохимической обстановки по годовым кольцам деревьев за время их существования [11]. Несмотря на методические трудности, связанные с пониманием механизма поступления химических элементов в древесину, этот способ исследования все чаще реализуется. В настоящей статье предпринята попытка увязать уровни накопления Hg в годовых кольцах деревьев с проявлением землетрясений и крупными разрывными нарушениями.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Отбор проб керна деревьев проводился в июле 2018 г. вблизи населенных пунктов, расположенных вдоль и вкрест простирания Тункинской впадины (рис. 1).

Древесный керн извлекали приростным буравом с 3 рядом стоящих деревьев примерно одного возраста, высоты и диаметра ствола. С каждого дерева отбиралось 2 керна с восточной и западной стороны (36 кернов сосны и 54 керна тополя). Концентрацию Hg определяли в каждом годовом кольце на ртутном анализаторе “РА-915М” методом атомной абсорбции в лаборатории микроэле-

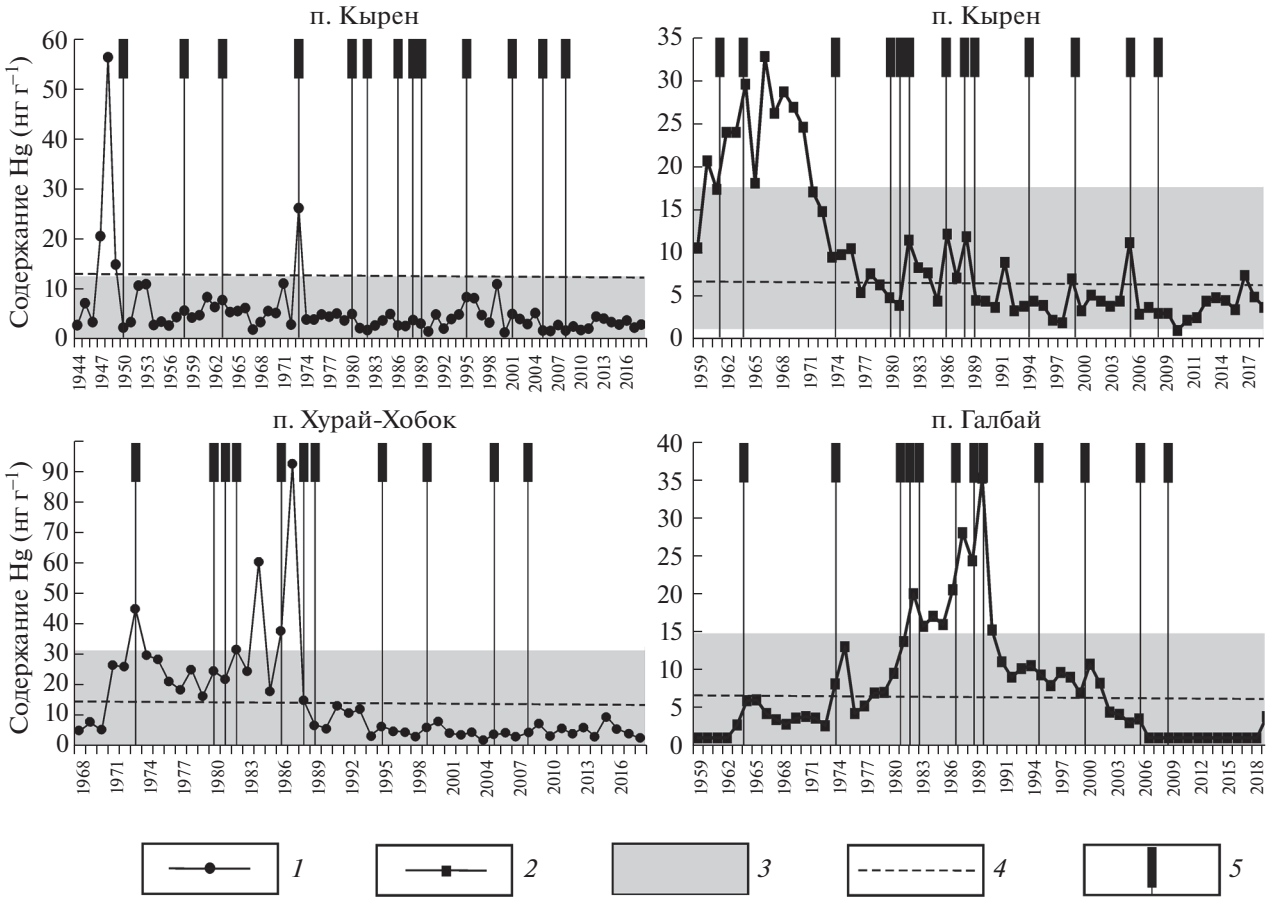

Рис. 2. Динамика содержания Hg в древесных кернах на территории Тункинской впадины: *1* – сосна; *2* – тополь; *3* – среднее содержание Hg в годовых кольцах с одним стандартным отклонением; *4* – среднее содержание Hg в общей выборке проб; *5* – землетрясения в районе Тункинской впадины с магнитудой *M*s > 4.0.

ментного анализа ТПУ (г. Томск). Градуировку выполняли по стандартному образцу “лист березы”. Предел обнаружения Hg – 1 нг/г, относительная погрешность 10–15%. Концентрации рассчитаны на 1 г сухого вещества.

При интерпретации полученных данных следует учитывать короткий временной интервал наблюдений (не более 70 лет) и 2 вида деревьев, отличающихся своей биологией произрастания: тополь душистый (*Populus suaveolens* Fisch.) (далее тополь) и сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) (далее сосна).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По данным измерений наибольший разброс содержаний Hg зафиксирован в кольцах тополя вблизи поселков Кырен, Галбай и Зун-Мурино (рис. 2, линия 2), также характеризующихся наибольшими средними содержаниями по сравнению с остальными точками отбора кернов. Среднее содержание Hg в кернах тополя в общей выборке 7 нг/г, при максимальном – 35 нг/г (рис. 3а).

Распределение содержания Hg в кернах тополя характеризуется периодами длительностью от 13 до 44 лет и кратностью от 2.6 до 7 раз. Вблизи пос. Кырен выделяются “отрезки” в кернах тополя со средним содержанием Hg 22 нг/г в период с 1957 по 1973 г. и 5 нг/г – с 1974 по 2018 г.

Похожий характер распределения содержания Hg в кернах отмечается и в керне тополя вблизи пос. Галбай: повышенное, по сравнению со средним для данной точки, содержание Hg в период с 1959 по 1981 г. (16 нг/г), затем с 1982 по 2006 г. снижение до 5 нг/г, а после 2007 г. увеличение до 13 нг/г.

Содержание Hg в керне тополя вблизи пос. Зун-Мурино отмечается пиком повышенного содержания Hg – 14 нг/г в период с 1978 по 2001 г., до 1977 и после 2001 г. среднее содержание 2–4 нг/г.

В исследованных кернах тополя в некоторых случаях максимальная концентрация Hg наблюдается непосредственно в год землетрясения

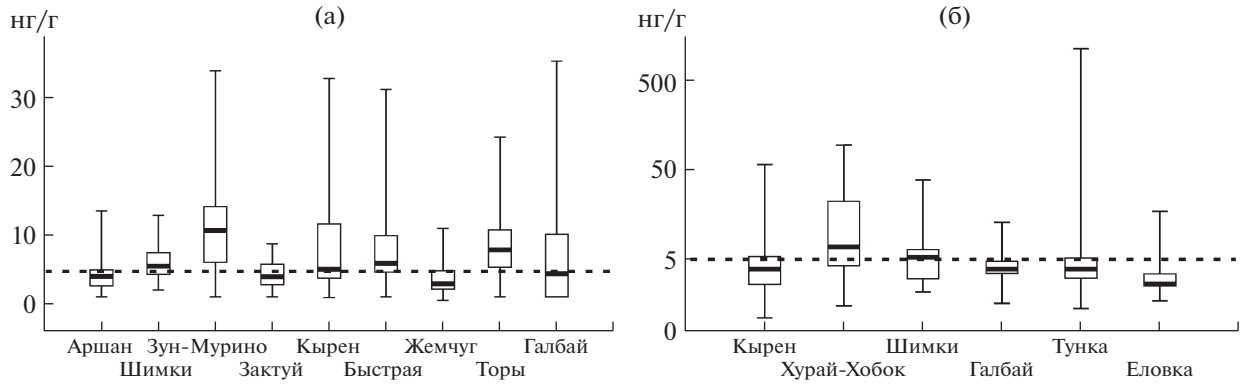

Рис. 3. Распределение содержания Hg (медиана, минимум-максимум, 25–75% квартили) в древесных кернах на территории Тункинской впадины: а – тополь (порядка 450 анализов); б – сосна (порядка 300 анализов). Пунктирная линия – локальный фон Hg.

(Галбай, 1989, 2016; Зун-Мурино, 1975), но чаще – до и/или после землетрясения (Зун-Мурино, 1957, 2016). Подобное несовпадение максимумов содержания Hg и дат землетрясений объясняется неодинаковым характером развития сейсмического процесса в разных случаях, а также различным количеством афтершоков, которые часто сопровождают не только относительно слабые, но и сильные землетрясения в районе исследований [9].

Следует отметить, что поступление Hg в древесину сосны более контрастно по сравнению с древесиной тополя (рис. 2, линия 1) и, по-видимому, отражает особенности ее накопления [12] (рис. 3б).

Среднее содержание Hg в кернах сосны в выборке составило 12.8 нг/г, максимальное – 1089 нг/г. Наибольший разброс содержаний Hg зафиксирован в годичных кольцах сосны вблизи пос. Тунка (1089 нг/г, 1991 г.). В данной местности фиксируются еще два пика эмиссии Hg (1996 и 1998 г.) и на этот интервал приходится три землетрясения с Ms = 4.

Изменение содержания Hg в керне сосны вблизи пос. Кырен отличается наличием двух значимых пиков с концентрацией Hg 56 и 26 нг/г. Среднее содержание во временном ряду с 1944 по 2018 г. составляет 5 нг/г. Поздний пик предшествует сейсмическому событию в регионе с Ms = 4.5 (1973 г.), а ранний – событию с Ms = 4 (1948 г.). В местности Хурай-Хобок повышение концентраций элемента начинается с 1971 г., достигая максимума в 1984–1987 гг.

Анализируя средние содержания Hg в керне тополя, выявили его увеличение в направлении с запада на восток от Тункинской котловины до Быстринской (от 6 до 9 нг/г). Увеличение содержания Hg в кернах тополя совпадает с направлением полосы, содержащей наибольшее количество эпицентров землетрясений, в том числе и наиболее сильных, а также близостью Главного Саянского разлома [9]. В керне сосны концентрации Hg увеличиваются от периферии к центральной части Тункинской котловины (от 4 до 67 нг/г).

Точки с аномально высокими содержаниями Hg в древесине сосны (до 1089 нг/г) и тополя (до 50 нг/г) тяготеют к крупным разрывным нарушениям как субширотного, так и СЗ-простирания. Максимальные содержания Hg наблюдаются в районе пос. Тунка, расположенного вблизи пересечения разломов (рис. 1б). Это свидетельствует о подновлении указанных разломов в результате землетрясений в современное время и создании вдоль них зон проницаемости для ртутоносных флюидов, так как БРЗ является флюидогенной системой [10].

Взаимосвязь содержания Hg в кернах тополя и сосны отсутствует во всех деревьях как отдельно для кернов только сосны и только тополя, так и в точках их совместного опробования. Однако на отдельных временных отрезках прослеживается связь, которая носит как прямой, так и обратный характер, согласно данным корреляционного анализа.

Полученный материал показывает, что далеко не все землетрясения сопровождаются ртутными аномалиями в древесине тополя и сосны. По-видимому, при движениях блоков земной коры, вызывающих землетрясения, не всегда возникают сквозные структуры, благоприятные для эмиссии Hg и других флюидов в верхние горизонты земной коры. Можно предположить, что они чаще возникают при землетрясениях, эпицентры которых приурочены к крупным разломам и их пересечениям. Не исключена и определенная последовательная этапность продвижения Hg к дневной поверхности. Аномальные содержания Hg в древесине тополя и сосны в период 2008–2018 гг. чаще приурочены к отрезкам разломов СЗ-про-

стирания, а аномалии в древесине тополя в период 1957–1968 гг. – к субширотному разлому на отрезке Зун-Мурино–Зактуй.

ВЫВОДЫ

Анализ динамики изменений содержания Hg за последние 60 лет позволил проследить связь между мелкими и крупными землетрясениями и пиками содержания Hg в годовых кольцах сосны и тополя, соответствующих этому периоду времени. Поступление индикаторного элемента крайне неоднородно и отражает степень проницаемости тектонических структур, которая постоянно изменяется.

Содержания Hg в годовых кольцах деревьев могут выступать как палеоиндикаторы деформаций земной коры, фиксируя как отдельные событийные процессы кратковременного сброса тектонических напряжений во время землетрясений, так и длительные динамические нагрузки на отдельные блоки земной коры.

Повышенные содержания Hg, возникшие при землетрясениях, приурочены к разрывным нарушениям как субширотного, так и северо-западного простирания.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны Н.А. Осиповой, заведующей лабораторией микроэлементного анализа Международного инновационного научно-образовательного центра “Урановая геология” ТПУ за метрологическое сопровождение аналитических работ.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены за счет средств госбюджетной темы ИМКЭС СО РАН и программы повышения конкурентоспособности Национального исследовательского Томского политехнического университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лунина О.В., Гладков А.С., Неведрова Н.Н.* Рифтовые впадины Прибайкалья: тектоническое строение и история развития. Новосибирск: Академическое изд-во “ГЕО”, 2009. 316 с.

2. *Кузьмин М.И., Ярмолюк В.В.* Тектоника плит и мантийные плюмы– основа эндогенной тектонической активности земли последние 2 млрд лет // Геология и геофизика. 2016. № 1. С. 7–26. https://doi.org/10.15372/GiG20160102

3. *Зорин Ю.А., Турутанов Е.Х.* Плюмы и геодинамика Байкальской рифтовой зоны // Геология и геофизика. 2005. Т. 46. № 7. С. 685–699.

4. *Коваль П.В., Удодов Ю.Н., Саньков В.А., Ясеновский А.А., Андрулайтис Л.Д.* Геохимическая активность разломов Байкальской рифтовой зоны (ртуть, радон и торон) // ДАН. 2006. Т. 409. № 3. С. 389–393.

5. *Вилор Н.В., Адрулайтис Л.Д., Зарубина О.В., Данилов Б.С.* Геохимия сейсмоактивных региональных разломов (Байкальская рифтовая зона, Восточная Сибирь) // Геохимия. 2015. № 1. С. 64–82. https://doi.org/10.7868/S0016752514101070

6. *Алехин Ю.В., Ковальская Н.В., Лапицкий С.А., Минубаева З.И., Пальяруло П.* Экспериментальное изучение диффузионной и фильтрационной миграции подвижных форм ртути и потока холодной эндогенной эмиссии // Вестник Отделения наук о Земле РАН. Электрон. науч.-информ. журн. 2003. №1 (21). http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2003/informbul-1/hydroterm-15.pdf. Ссылка активна на 1 ноября 2019.

7. *Трошин Ю.П., Ломоносов И.С., Брюханова Н.Н.* Условия формирования рудно-геохимической специализации современных гидротерм Байкальской рифтовой зоны // Геология и геофизика. 2008. Т. 49. № 3. С. 226–234.

8. *Соктоев Б.Р., Рихванов Л.П., Ильенок С.С., Барановская Н.В., Тайсаев Т.Т.* Минералого-геохимические особенности травертинов современных континентальных гидротерм (скважина Г1, Тункинская впадина, Байкальская рифтовая зона) // Геология рудных месторождений. 2015. Т 57. № 4. С. 370–388. https://doi.org/10.7868/S0016777015040048

9. *Голенецкий С.И.* Сейсмичность района тункинских впадин на юго-западном фланге Байкальского рифта в свете инструментальных наблюдений второй половины XX века // Геология и геофизика. 1998. Т. 39. № 2. С. 260–270.

10. *Озерова Н.А.* О ртутной дегазации Земли // Бюллетень Московского общества испытателей природы. 2005. Т. 80. Вып. 5. С. 63.

11. *Clackett S.P., Porter T.J., Lehnherr I.* 400-Year Record of Atmospheric Mercury from Tree-Rings in Northwestern Canada // Environmental Science & Technology. 2018. V. 52 (17). P. 9625–9633. https://doi.org/10.1021/acs.est.8b01824

12. *Фомин Б.Н., Николишин И.Я., Воронская Г.Н.*Исследование миграции ртути и кадмия в системе атмосфера-растение-почва с использованием изотопно-трассерных экспериментов в многоотсековых экостатах // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 1992. № 14. С. 103–118.

MERCURY EMANATIONS FROM THE BAIKAL RIFT ACCORDING TO THE STUDY OF ANNUAL TREE RINGS (ON THE EXAMPLE OF THE TUNKA DEPRESSION)

L. P. Rikhvanov[a], **E. E. Lyapina**[b,#], **D. V. Yusupov**[a,c,##], **E. M. Tursunalieva**[a], **and A. A. Pavlova**[a]

[a] *National research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation*

[b] *Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation*

[c] *Amur state University, Blagoveshchensk, Russian Federation*

[#] *E-mail: eeldv@mail.ru*

[##] *E-mail: yusupovd@mail.ru*

Presented by Academician of the RAS V.G. Moiseenko October 10, 2020

The phenomenon of natural degassing of mercury in the Baikal rift zone according to the study of annual rings of poplar (*Populus suaveolens* Fisch.) and pine (*Pinus sylvestris* L.) is considered. Tree core samples were taken in the Tunka depression in July 2018 with the help of a drill. The boundaries of the annual rings were highlighted on a LINTAB instrument with TSAP-Win and Lignovision software. Analysis of Hg was performed on a mercury analyzer "RA-915M" by pyrolysis. The dynamics of changes in the concentration of Hg in the annual rings of poplar and pine in the Tunka depression from 1940 to 2018 was traced. The average Hg content in all examined wood cores was 7 ng/g, the maximum – 1089 ng/g. Increased Hg contents are confined to faults of both sublatitudinal and northwestern striking. The maximum concentration of Hg was found in pine and poplar cores at the intersection of large tectonic faults. The relationship between peaks of high concentrations of Hg in wood and periods of strong earthquakes with a magnitude of more than 4.0 was traced. The obtained data can act as paleoindicators of deformations of the earth's crust, recording both individual processes of short-term relief of tectonic stresses and strong earthquakes.

Keywords: mercury, Baikal rift zone, dendrogeochemistry, poplar, pine, earthquake