

УДК 550.4:502.175(571.53)

УРАН В ВОДЕ БАЙКАЛЬСКОЙ ЭКОСИСТЕМЫ

© 2023 г. В. И. Гребенщикова^{1,*}, академик РАН М. И. Кузьмин¹, В. М. Демьянович²

Поступило 26.05.2023 г.

После доработки 20.06.2023 г.

Принято к публикации 28.06.2023 г.

Выполнен анализ распределения концентраций урана в воде сопряженных компонентов Байкальской экосистемы — в воде Байкала, притоков, истока Ангары, в подземной воде из скважин на острове Ольхон и в юго-западной береговой части Байкала. Установлены значимые различия в максимальных содержаниях урана в подземной воде Байкала и его притоках, но близкие средние и медианные значения элемента в воде Байкала и его стока — р. Ангары. Полученные данные по распределению урана фиксируют влияние геолого-геохимических особенностей строения Байкальской экосистемы и его окружения и происходящих в регионе климатических и катастрофических (землетрясения, сейсмогеодинамические активизации и др.) событий. Проведен анализ изменения концентрации урана в воде Байкала, в соотношении с сейсмическим процессом, на примере сильных землетрясений ($M \geq 5$) в районе озера Байкал.

Ключевые слова: уран, вода, Байкал, притоки, скважины, исток Ангары

DOI: 10.31857/S2686739723601114, **EDN:** MCDKYC

Известно, что уран обнаружен во всех компонентах окружающей среды: метеориты, лунные породы, во всех типах осадочных и магматических пород, в водных объектах, почвах, растениях и других средах. Изменения концентраций урана отмечены в сопряженных водных объектах Байкальской рифтовой зоны, где расположено озеро Байкал.

Озеро Байкал находится на границе Сибирской платформы и Центрально-Азиатского складчатого пояса. Пространственно озеро приурочено к Байкальской рифтовой зоне, которая является активной до настоящего времени (более 25 млн лет), что подтверждается частыми землетрясениями и геодинамическими подвижками в Байкальском регионе [1].

В Прибайкалье интенсивно проявлена магматическая и вулканическая деятельность [2, 3], представленная разновозрастными образованиями от архея до кайнозоя, имеющими состав от основных до кислых и щелочных. Породы вокруг Байкала имеют различную геохимическую и металлогеническую специализацию, что, несомненно, оказывает влияние на химический состав многочисленных притоков Байкала и, соответственно, на воду самого озера Байкал, сохраняя, тем не менее, его стабильное состояние в последнее столетие.

С восточной стороны Байкала расположен огромный Ангаро-Витимский батолит палеозойского возраста, также представленный большим разнообразием пород от габброидов, монцодиоритов до гранитов и щелочных сиенитов [4]. Породы батолита дренируют многочисленные притоки Восточного Прибайкалья (реки Томпуда, Усть-Баргузин, Турка и др.).

В озере Байкал выделены 3 котловины разной глубины, самая глубокая расположена в центре Байкала — 1642 м. Вода вдоль берегов и в каждой котловине движется против часовой стрелки, отмечаются подъем глубинной воды в пелагиальной зоне Байкала и опускание поверхностной воды в литоральных зонах (апвеллинг/даунвеллинг) Байкала [5]. За счет последнего процесса происходит постоянное перемешивание и обновление воды Байкала. Кроме этого, отмечается возможное поступление глубинной (ювенильной) воды при землетрясениях и геодинамических подвижках [6–8], что также способствует постоянному обновлению воды Байкала.

Зимой Байкал замерзает, а исток Ангары не замерзает никогда. Это объясняется нахождением под мощным слоем льда и снега (обычно более 1 м) незамерзающего подледного термоклина воды с температурой около 1–4°C [9], что позволило проводить геохимические исследования воды Ангары в мониторинговом (ежемесячном) режиме.

Целью данной работы являются сравнение и объяснение возможных причин значимых различий в распределении урана в воде некоторых сопряженных компонентов Байкальской экосистемы.

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

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

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

мы — в скважинах в береговой зоне Байкала, в скважинах на острове Ольхон, в воде Байкала, в воде устьев крупных притоков и единственного стока — реки Ангары.

Достижению поставленной цели способствует многолетний ежегодный (и ежемесячный) мониторинг состава воды истока Ангары (1997–2022 гг.), а также проводимые в разные годы анализы проб воды устьев притоков, скважин, поверхностной и глубинной воды Байкала, в которых выполнен химический анализ на широкий круг элементов, включая уран. Важной фундаментальной задачей являются сравнение и выявление причин установленных отличий в содержаниях урана в воде между сопряженными компонентами Байкальской экосистемы. Ранее такие отличия были выявлены преимущественно только при сравнении воды истока Ангары и Байкала [10].

Химический анализ урана в воде проводился методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ELEMENT 2, “Finnigan MAT”, Германия) с использованием научного оборудования аккредитованного и сертифицированного аналитического центра “Изотопно-геохимические исследования” Института геохимии СО РАН [11]. На месте отбора проб воды на анализ использовался фильтр 0.45 мм, консервация пробы проводилась азотной кислотой.

ПОДЗЕМНАЯ ВОДА БАЙКАЛА (СКВАЖИНЫ)

В питьевых водах уран нормируется по химической токсичности. В России предельно допустимая концентрация (ПДК) урана в питьевых водах принята равной 15 мкг/л [12], в Соединенных Штатах Америки равным — 30 мкг/л. Всемирная организация здравоохранения рекомендует норматив 15 мкг/л.

Распределение содержаний урана изучено в скважинах, расположенных в западной береговой части Байкала и на острове Ольхон (рис. 1). На Ольхоне пробы воды отбирались в скважинах глубиной до 70 м и анализировались в разное время 2018 и 2020 г. (весна, осень, зима).

В подземной воде Ольхона установлены самые высокие концентрации урана (рис. 2), однако особых различий в содержаниях в зависимости от года отбора проб и сезона не отмечено: 8.2–12.6 мкг/л. Повышенные содержания урана в подземных водах Ольхона могут быть обусловлены наличием в породах не только обнаруженного В.И. Вернадским урансодержащего “менделеевита”, позднее диагностированного как оксиуранобетафит надгруппы пирохлора [13], но и урансодержащего ортита в пегматоидных жилах, характерных для субщелочных габброидов и древних гранитоидов Ольхона [2].

В береговой части Байкала в районе пос. Саяхурта (переезд через пролив Ольхонские ворота с острова Ольхон на противоположный западный берег Байкала) анализ подземной воды из 2 скважин глубиной 60–70 м показал близкие к подземной воде о. Ольхон значения концентраций урана — 3.2–5.1 мкг/л.

Южнее Ольхона на берегу Байкала в пос. Еланцы в скважине глубиной около 30 м содержание урана на порядок ниже и составляет 0.74 мкг/л. В юго-западной береговой части Байкала (примерно 200–250 км от п. Еланцы) опробование подземных вод выполнено в двух местах. В пос. Листвянка в береговой части на расстоянии 5 км перед истоком Ангары опробовано 8 скважин разной глубины (5–130 м) (рис. 1). В геологическом разрезе здесь представлены четвертичные аллювиально-деллювиальные отложения и протерозойские магматические породы (граниты, гранодиориты) [14]. Содержание урана в подземной воде п. Листвянка изменяется от 0.03 до 5.5 мкг/л и не коррелируется с глубиной скважин.

В 4 км южнее Байкала в пос. Никола в роднике на берегу Ангары содержание урана изменяется в пределах 0.7–1.9 мкг/л (в разное время 2019–2020 гг., анализ выполнен в 8 пробах). В воде скважины глубиной 60 м, расположенной недалеко от этого источника, содержание урана в воде составляет 0.65 мкг/л.

Для сравнения, в пользующемся большим спросом у жителей Иркутска в роднике пос. Худяково (около 70 км на север от южного Байкала за пределами Байкальской рифтовой зоны), содержание урана в воде стабильное и почти не изменяется — 0.04–0.05 мкг/л (в разное время в 2019–2020 гг. взято 5 проб).

Таким образом, повышенные содержания урана в подземных водах отмечены только на острове Ольхон и на противоположном берегу через пролив рядом с ним.

ПРИТОКИ БАЙКАЛА

Вода притоков Байкала отбиралась и анализировалась несколько раз: летом 2007 г., весной-осенью 2018–2020 гг. и осенью 2022 г. Из значительного числа притоков Байкала (>360) опробовались устья в основном крупных и доступных для изучения притоков, всего исследовано 35–40 притоков. Анализы выполнены в 228 пробах воды (рис. 2, 3). Соответственно, в связи с неоднократным опробованием анализ в некоторых притоках на определение урана выполнялся 3–7 раз в разное время года на протяжении последних 15 лет.

Полученные данные показали сходимость повышенных концентраций урана в воде некоторых притоков в независимости от сезона и года опробования. К притокам Байкала с повышенным со-

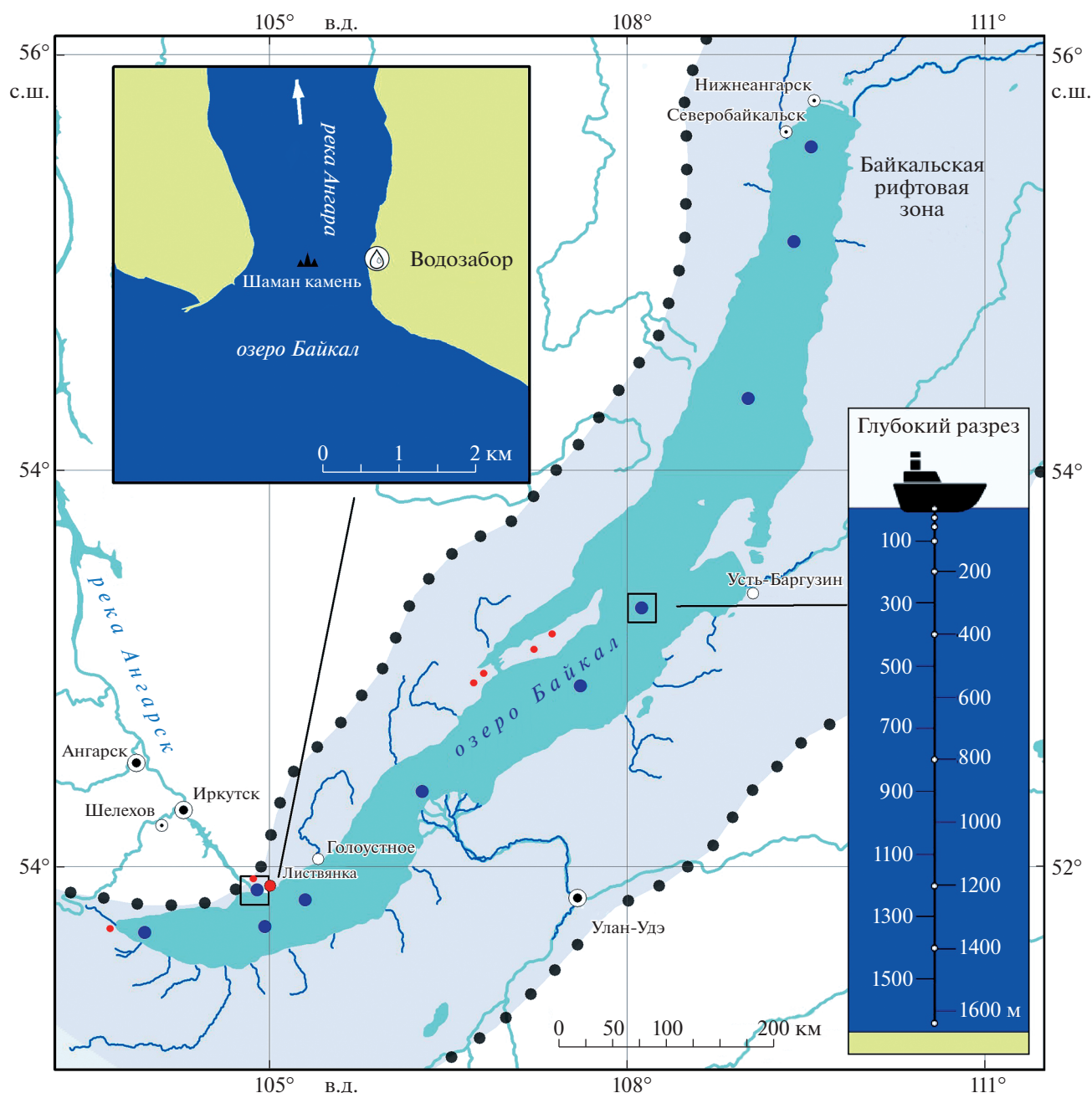


Рис. 1. Карта-схема отбора проб воды Байкальской экосистемы. Красным цветом показаны скважины.

держаниям урана в воде относится вода устьев следующих рек: р. Анга (взято 7 проб), содержания урана находятся в пределах 1.5–2.6 мкг/л, р. Рыты (1 проба) – 2.5 мкг/л, р. Селенга (8 проб) – содержания 1.3–1.6 мкг/л, р. Бугульдейка (3 пробы) – 1.3–1.7 мкг/л (рис. 3, 4). В остальных изученных притоках содержание урана в воде меньше 1 мкг/л.

В зависимости от места нахождения рек установлено, что максимальные концентрации урана всегда при опробовании отмечались на западном берегу Байкала в устьях р. Анги и на СЗ в р. Рыты. В устьях этих рек в породах зафиксированы па-

леопротерозойские граниты [3] и найдены уран-содержащие минералы [13]. В нескольких близлежащих к р. Анге притоках (Кучелга, Курма, Шида, Бугульдейка и ключ Смородиновый) концентрации урана также повышены и составляют 1.2–2 мкг/л (рис. 3).

В притоках восточной части Байкала повышенные концентрации урана (до 1–2 мкг/л) отмечены в устьях рек Селенга, Усть-Баргузин и Томпуда. В этой береговой части Байкала расположен крупнейший (площадь более 300 кв. км.) Ангаро-Витимский батолит, сложенный ранне- и познепалеозойскими гранитоидами. Главным но-

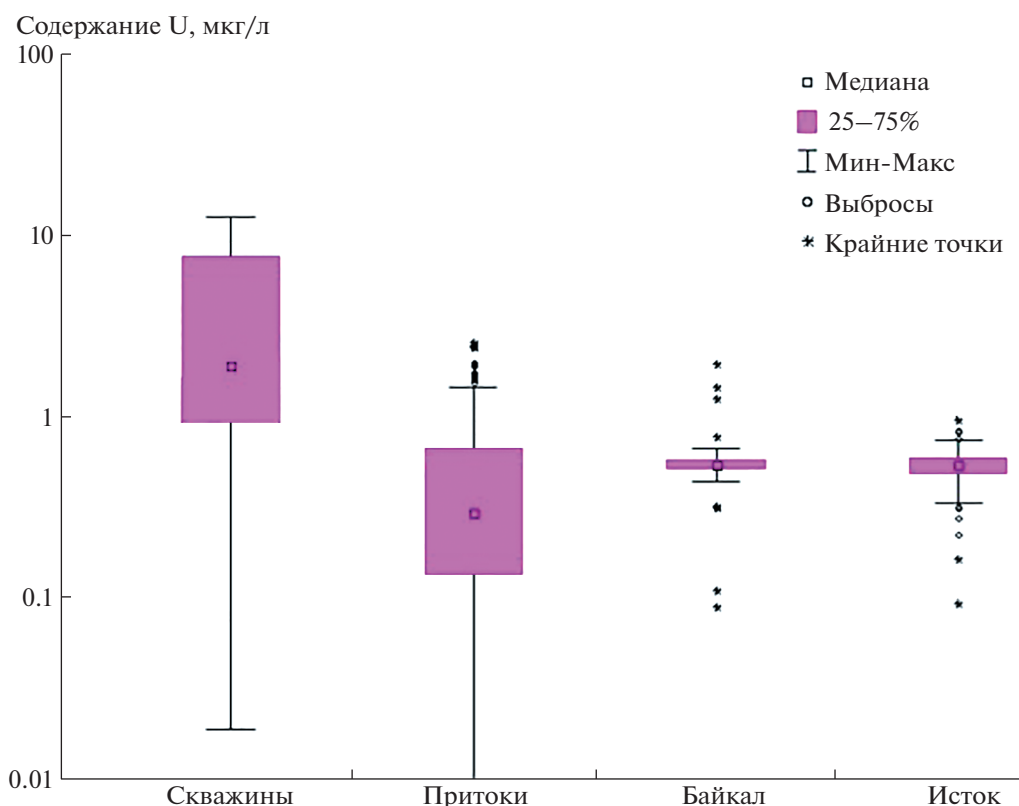


Рис. 2. Блок-диаграмма распределения концентраций урана в воде Байкальской экосистемы.

сителем урана являются монцитонитовидные породы батолита и более поздние щелочные граниты и сиениты [4]. Источником урана в воде устьев восточных притоков Байкала также может быть его поступление в притоки при дренировании небольших штоков альбитизированных гранитов, расположенных вблизи восточного берега Байкала, с урансодержащими минералами — фергусонитом и самарскитом [15].

Из восточных притоков Байкала в р. Селенге за последние 15 лет всегда отмечалось повышенное содержание урана в воде. Селенга вместе с многочисленными притоками занимает большую территорию с восточной стороны Байкала, и играет ведущую роль в его водосборе. Содержание урана в воде Селенги заметно выше, чем в других восточных притоках. Известно, что в одном из притоков Селенги расположено урановое месторождение, разведка которого приводит к выщелачиванию урана из руд, поступление его в воду и дальнейшему переносу Селенгой в Байкал. Кроме этого, промышленные предприятия Монголии также могут оказывать негативное влияние на воду Селенги. Однако дельта Селенги представляет собой обширный геохимический барьер, где большая часть токсичных компонентов осаждается в литоральной части Байкала, и не может оказывать серьезного загрязнения воды Байкала.

ВОДА БАЙКАЛА

В течение 2011–2022 гг. в самом озере Байкал опробование глубинной и поверхностной воды проводилось преимущественно в глубокой центральной котловине (1642 м), реже в южной. Всего анализ воды на определение урана выполнен в 140 проб воды, из них 80 — глубинных проб и 60 — поверхностных проб, отобранных в пелагиальной части на всем протяжении Байкала. Содержание урана в воде Байкала довольно стабильно: его медиана и среднее значение различаются в небольших пределах 0.52–0.59 мкг/л. Такие же слабые различия характерны для его распределения в поверхностной воде Байкала на всем протяжении с севера на юг озера (рис. 2, 3) и на глубину в центральной котловине в спокойное время года. Не установлено зависимости концентраций урана в воде Байкала и от сезонов года (весна-осень), они остаются стабильными и близкими (рис. 4, 2018–202 гг., весна-осень).

В 2018 г. в поверхностной воде Байкала повышенных содержаний урана не установлено. В отличие от урана в это время зафиксировано повышение ртути в 2 раза выше ПДК рыбохозяйственных водоемов [17]. Однако в начале июня 2020 г. после землетрясения в поверхностной пелагиальной воде Байкала были зафиксированы повышенные в 2–4 раза содержания урана. Повышение отмечалось только в трех местах Байка-

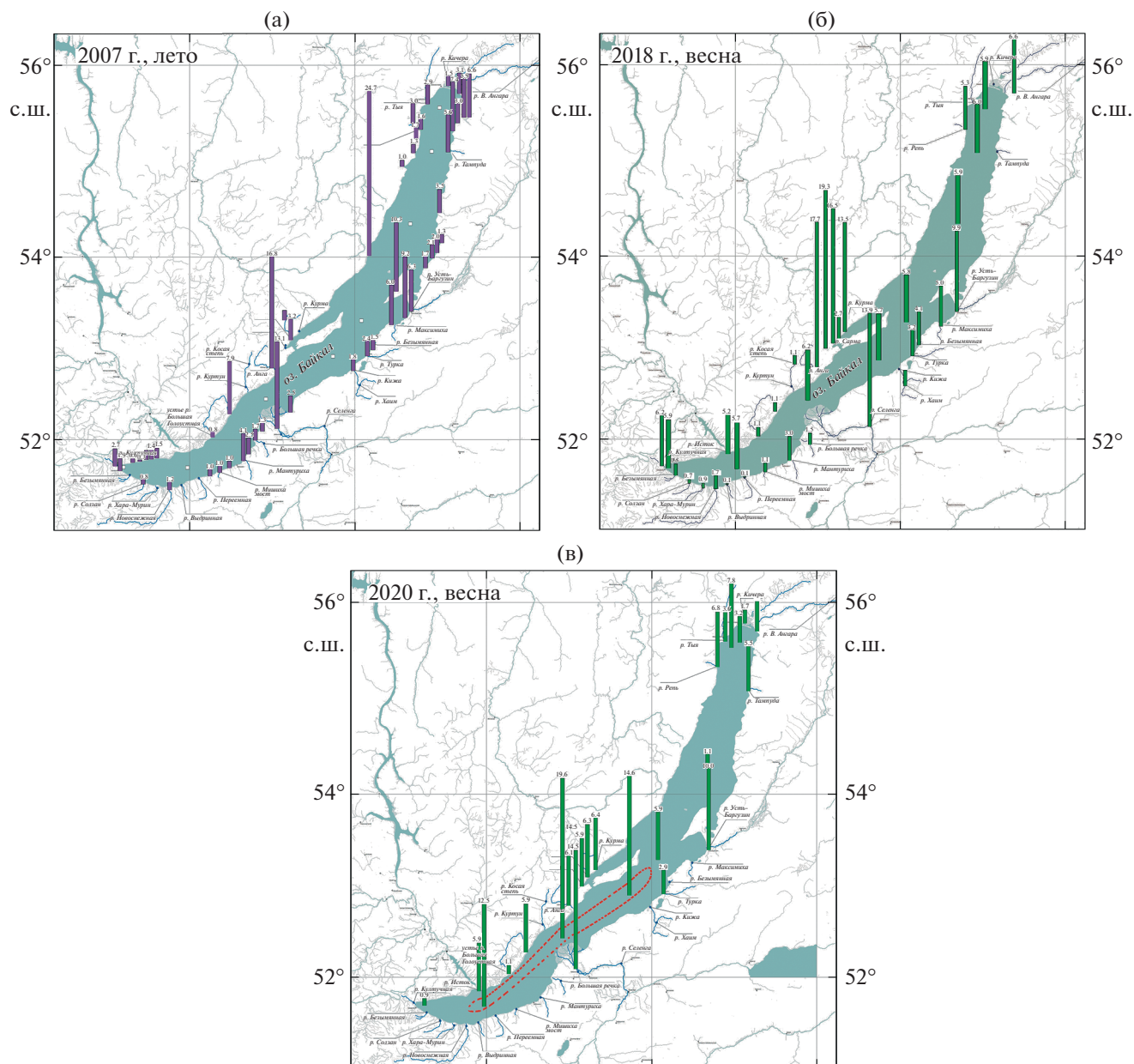


Рис. 3. Распределение концентраций урана в поверхностной воде Байкала и в устьях некоторых притоков летом 2007 г., весной 2018 и 2020 г.

ла: от Листвянки-Танхоя до Хобой-Крестовый, т.е. на расстоянии более 200 км. При этом севернее и южнее этой линии содержание урана, т.е. на севере и юге в центре пелагиальной части Байкала концентрации урана были минимальными 0.1–0.3 мкг/л, т.е. даже ниже среднего значения по Байкалу – 0.54 мкг/л. Эта информация отчетливо фиксируется на графике (рис. 3) как максимальными (4 крайних верхних точки), так и минимальными (3 крайних нижних точки) значениями урана, как и на рисунке (рис. 4, весна). Такого повышения урана в поверхностной воде в центральной части Байкала за все годы исследований ранее не отмечалось.

О.А. Склорова [16] отмечает, что содержание урана в воде Байкала приближается к максимальным значениям для чистых поверхностных вод Мира и характеризует геохимический фон в озере Байкал. Многие другие микроэлементы в воде либо близки к средним мировым значениям воды, либо находятся на уровне минимальных показателей. Разница между минимальными и максимальными значениями концентраций некоторых микроэлементов в чистых поверхностных водах достигает нескольких порядков, как и в воде Байкала [17]. Максимальные содержания урана (примерно в 1.5–2 раза), превышающие среднее (0.56 мкг/л) и медиану (0.55 мкг/л), отмеча-

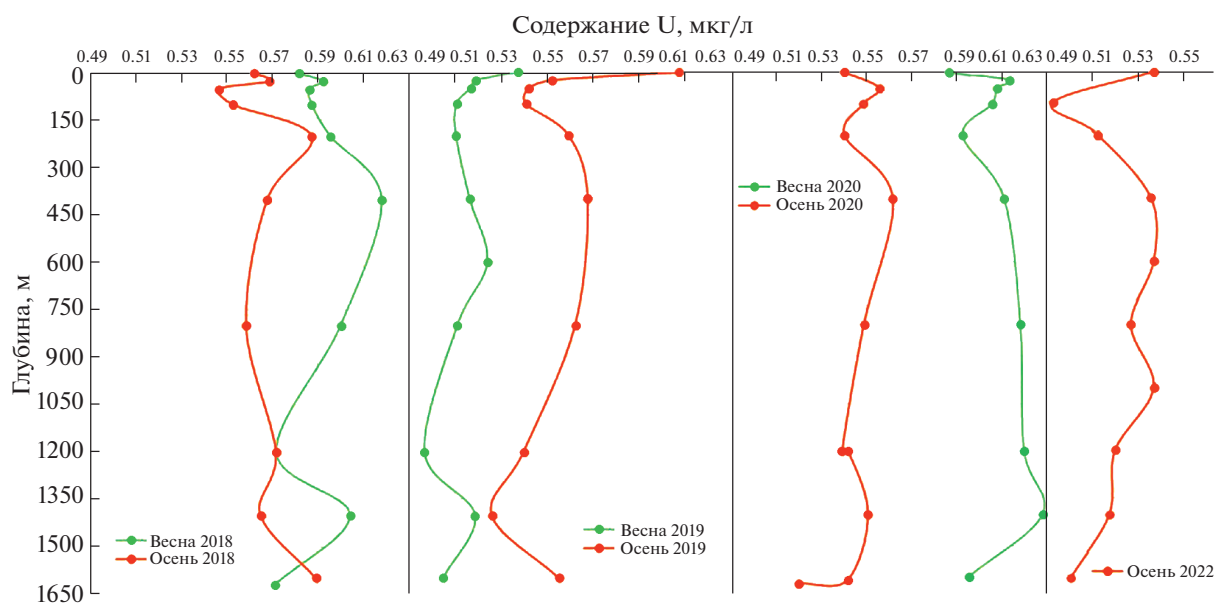


Рис. 4. Распределение урана в глубинной воде Байкала весной (зеленое) и осенью (оранжевое) в 2018–2022 гг.

ются за время исследования только в июне 2020 г. преимущественно в южной части Байкала от острова Ольхон до Листвянки-Танхой (рис. 3) (выделено на карте красным пунктиром). На этом расстоянии (примерно 200–250 км) содержания урана в поверхностной воде Байкала в 3 местах достигали значений 1.3–1.5–2.0 мкг/л, что в 2–4 раза выше средних и медианных значений для воды Байкала в целом.

Отмеченный период — 2020 г. совпадает с многочисленными сейсмическими событиями, происходящими в районе озера Хубсугул, которые менее интенсивно отразились на событиях в Байкале. Такие подвижки были ощутимы для жителей Иркутска. Возможно, что отсутствие более сильных движений в Байкале привели к перемещению и частичному воздействию на придонные железомарганцевые конкреции Байкала, характеризующиеся повышенным содержанием урана в них [18]. Заметные изменения в придонной части Байкала происходили в его наиболее глубинной центральной части, что зафиксировалось в повышении в воде урана, а также других элементов (Th, Nb, Ta, W), характерных для конкреций Байкала. Последнее свидетельствует о том, что во время землетрясений в Прибайкалье уран мог дополнительно поступать в Байкал с водой притоков, а также при разрушении Fe–Mn-конкреций, возможен также и глубинный привнос, что отмечается исследователями в сейсмоактивных регионах России [19].

ИСТОК АНГАРЫ

В истоке Ангары отбор и анализ проб на микроэлементы, в том числе и на определение урана

в воде проводились ежемесячно, иногда чаще, начиная с 1997 г. (рис. 5). За прошедшие годы (2006–2022 гг.) всего выполнено в воде истока 194 анализа. Содержания урана находятся в пределах одного порядка значений — от 0.1 до 0.96 мкг/л, среднее — 0.54 мкг/л, медиана — 0.55 мкг/л. Максимальные концентрации урана в воде истока за весь период исследований отмечены только 3 раза: март 2008 г., январь 2011 г. и февраль 2020 г., когда его содержание увеличивалось почти в 2 раза (рис. 5). Возможно, высокий уровень воды в Байкале, который отмечался в перечисленные годы, способствовал размыву и разрушению берегов Байкала, а соответственно, разрушению и выщелачиванию элементов из вмещающих пород с последующим растворением в воде, выносом их из устьев притоков в Байкал и лишь частичному захоронению на геохимических барьерах. Поскольку течения в Байкале направлены против часовой стрелки и только затем подходят к истоку Ангары, то повышенные значения урана в воде притоков могут фиксироваться и в воде истока, но уже в разбавленном виде — меньшие концентрации. Получается, что исток Ангары фиксируется концентрациями, точнее остатками концентраций в воде, включая повышенные значения в западных притоках Байкала (Анга, Бугульдейка и др.), благодаря течению вдоль берегов против часовой стрелки.

Сильные геодинамические воздействия под воздействием глобальных сил могут приводить к кратковременному раскрытию локальных участков зоны глубинных разломов, поступлению мантийных флюидов в кору, проницаемость которой повышается в результате деструкции литосферы и, принимая во внимание разломно-бло-

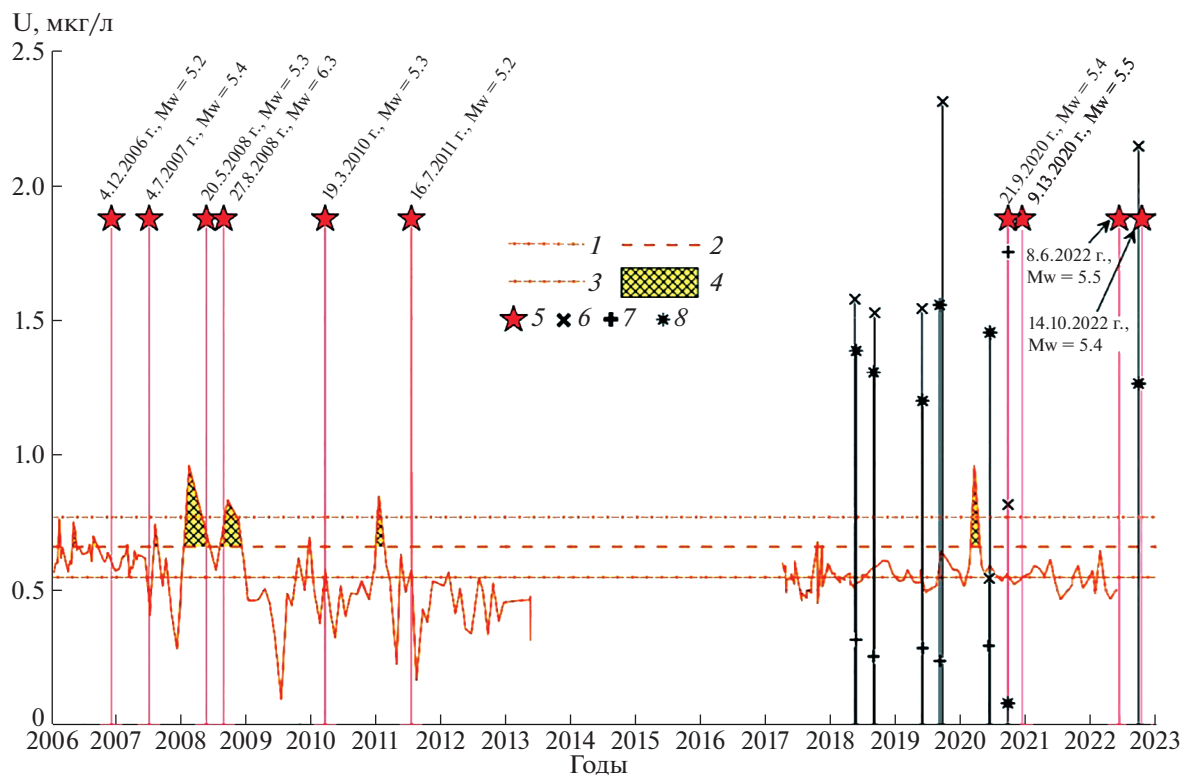


Рис. 5. График распределения значений концентрации U в воде истока Ангары в 2006–2022 гг. 1 – среднее значение; 2 – сигма; 3 – 2 сигмы; 4 – область значений графика, превышающих сигму; 5 – землетрясения с $M_b \geq 5$; значения концентрации в притоках: 6 – р. Анга; 7 – р. Турка; 8 – р. Селенга.

ковую структуру Байкальской рифтовой зоны, способствуют сейсмогеодинамической активизации блоков литосферы. Эти факторы могут приводить к поступлению урана на поверхность по зонам раскрытых разломов.

С учетом этих представлений, приведем результаты анализа изменения концентраций урана в воде Байкала, беря за основу пункт замеров в истоке р. Ангары в соотношении с сейсмическим процессом, на примере сильных землетрясений ($M \geq 5$) в районе озера Байкал (рис. 5).

В 2006 г. было отмечено 3 пика концентрации урана, что может коррелировать с активизацией блоков литосферы в районе центрального Байкала, где произошел ряд умеренных землетрясений. В следующем году в июле были сделаны замеры в притоках Байкала (рис. 3). Были отмечены повышенные значения урана на севере Байкала, где в это время произошло Томпудинское землетрясение 4 июля 2007 г. с $K_p = 14.2$, $M_w = 5.4$, $I_0 = 7-8$. Повышенные значения урана отмечались в притоках Рыты, Анга, Бугульдейка, Святой Нос, Селенга, что может подчеркивать активизацию блоков в центре Байкала. В истоке Ангары максимальное значение было зафиксировано в 8 августа (0.74 мкг/л), коррелирующее с наиболее сильным в районе землетрясением 19 августа с $K_p = 11.7$. В 2008 г. была зафиксирована мак-

симальная концентрация урана в истоке за время наблюдений (0.96 мкг/л). Проба была взята 14 февраля, за три месяца до Максимихинского землетрясения 20 мая 2008 г. с $M_w = 5.3$, $I_0 = 7$ (Центральный Байкал, около 300 км от истока) и за 6 мес до Култукского землетрясения 27 августа с $M_w = 6.3$, $I_0 = 8-9$ (Южный Байкал, около 60 км от истока). В июле концентрация снизилась (0.57 мкг/л), а в сентябре и ноябре повысилась до максимальных значений (0.83 и 0.75 мкг/л). Максимальные значения, зафиксированные в 2008 г., превышают 2 сигмы, что статистически свидетельствует о связи повышенных концентраций урана в воде с Култукским землетрясением, сильнейшим за исследуемый период в районе озера Байкал, а возможно и с Максимихинским землетрясением.

В следующем, 2009 г. сейсмическая активность значительно снизилась, сильных землетрясений в регионе не происходило. Уровень концентрации урана в истоке значительно уменьшился, большую часть года был ниже среднего значения. Лишь в конце года был небольшой всплеск (0.69 мкг/л), за два месяца до землетрясения, зарегистрированного в Южном Байкале к востоку от бухты Песчаной. Несмотря на умеренный энергетический уровень, оно отчетливо ощущалось на территории Южного Прибайкалья.

В 2010 г. уровень концентрации урана был ниже среднего значения. Следующий пик (0.84 мкг/л), превышающий 2 сигмы, был зафиксирован в начале января 2011 г., за 6 мес до сильного Туркинского землетрясения 16 июля с $K_p = 14.5$, $M_w = 5.2$, $I_0 = 7-8$ (Центральное Прибайкалье, более 250 км от истока). Вероятно, это свидетельствовало о геодинамической активизации блоков литосферы в центральном Байкале, где также произошел ряд умеренных землетрясений и увеличилась общая сейсмическая активность. В следующий период времени до середины 2013 г. уровень концентрации урана значительно понижается, опустившись ниже средних значений. Сильных землетрясений в этот период не произошло.

С мая 2013 г. до апреля 2017 г. мониторинговые наблюдения не проводились. С апреля 2017 г. до марта 2020 г. уровень концентрации урана в воде истока р. Ангары фиксировался в районе среднего уровня с небольшими флуктуациями. Сильных землетрясений в исследуемом районе не происходило. Пик концентрации урана в истоке р. Ангара был зафиксирован 17 марта 2020 г. за 6 мес до Быстринского землетрясения с $M_w = 5.4$ (100 км от истока) и за 9 мес до Кударинского землетрясения 9 декабря с $M_w = 5.5$ (130 км от истока). С 2018 г. раз в полгода стали проводиться измерения на притоках Байкала. На рис. 3 показаны высокие значения концентрации урана в притоках и глубинной воде в районе центра Байкала, свидетельствующие о сейсмогеодинамической активизации блоков литосферы с последующей реализацией Кударинским землетрясением. В 2022 г. максимальные значения концентрации урана были зафиксированы в притоках рек Анга и Селенга за полмесяца до второго Голоустенского землетрясения 14 октября с $M_w = 5.4$.

Полученные результаты позволяют заключить, что со всеми сильными землетрясениями ($M \geq 5$), произошедшими в районе Южного и Центрального Байкала, связаны значимые увеличения концентрации урана в воде Байкала. В отдельных случаях это подтверждено и для севера Байкала. Причем повышения уровня концентрации происходили за несколько месяцев до события (в трактовке изложенных выше представлений это свидетельствует о сейсмогеодинамической активизации блоков литосферы, которая приводит к реализации сильных землетрясений). В ряде случаев наблюдалось увеличение концентрации непосредственно перед землетрясением и сразу после него (несколько дней), но учитывая большие перерывы между наблюдениями, это зафиксировать удавалось не всегда.

Таким образом, можно утверждать, что стабильные содержания урана в воде Байкала и его стока Ангара поддерживаются как его поступлением с глубинной водой во время частых сейсмо-

геодинамических активизаций блоков литосферы, так и дополнительным выщелачиванием из ураносодержащих вмещающих Байкал пород и рудопроявлений. Достоверность этой связи подтверждена статистически — всем значимым максимумам урана в воде Байкальской экосистемы соответствуют сильные сейсмогеодинамические воздействия. Проведенные исследования показали, что состояние воды Байкала зависит не только от состава вмещающих пород, но и от природных катаклизмов. В связи с этим необходимо продолжение постоянных геохимических и сейсмогеодинамических исследований в мониторинговом режиме в Байкальской экосистеме.

Сравнительный анализ распределения концентраций урана в воде в сопряженных компонентах Байкальской экосистемы позволил выявить различия в концентрациях между подземными водами вокруг Байкала и водой устьев притоков, при этом установить близкие концентрации урана в глубинной и поверхностной воде Байкала с его единственным стоком — водой реки Ангара. На фоне отмеченных различий отчетливо просматривается возможность дополнительного поступления в Байкал и его обновления глубинной (ювенильной) воды при многочисленных землетрясениях в Байкальской рифтовой зоне.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнялась при поддержке РФФИюфи_м № 17-29-05022, РФФИ и МОКНМС № 20-55-44011 и в рамках государственного задания ИГХ СО РАН № 0284-2021-0003.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ключевский А.В., Гребенищикова В.И., Кузьмин М.И., Демьянович В.М., Ключевская А.А. О связи сильных геодинамических воздействий с повышением содержания ртути в воде истока р. Ангара // Геология и геофизика. 2021. Т. 62. № 2. С. 293–311.
2. Макрыгина В.А., Суворова Л.Ф., Зарубина О.В., Брянский Н.В. Геохимия щелочных сиенитов Будунского массива и особенности их петрогенезиса (о. Ольхон) // ДАН. 2016. Т. 469. (3). С. 336–343.
3. Sklyarov E.V., Sklyarova O.A., Lavrenchuk A.V., Menshagin Yu.V. Natural pollutants of Northern Lake Baikal // Environmental Earth Sciences. 2015. V. 74. P. 2143–2155.
4. Гребенищикова В.И., Носков Д.А., Герасимов Н.С. Геохимия и условия формирования Ангаро-Витимского гранитоидного батолита, Прибайкалье // Вестник ИрГТУ. 2009. № 3. С. 24–30.
5. Шимараев М.Н., Троицкая Е.С., Блинов В.В., Иванов В.Г., Гнатовский Р.Ю. Об апвеллингах в озере Байкал // ДАН. 2012. Т. 442. № 5. С. 696–700.
6. Диденков Ю.Н., Бычинский В.А., Ломоносов И.С. О возможности существования эндогенного источника пресных вод в рифтовых геодинамических

- ских условиях // Геология и геофизика. 2006. Т. 47. № 10. С. 1114–1118.
7. Диденков Ю.Н., Проскурякова З.В., Хаустов В.В., Мартынова М.А. Рифтогенное единство ультрапресных вод и углеводородов Байкальского региона // Сборник материалов четвертой Всероссийской научной конференции с международным участием “Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами”. Улан-Удэ: Бурятский научный центр Сибири СО РАН. 2020. С. 327–330.
 8. Troitskaya E., Budnev N., Shimaraev M. Changes in the Heat Content of Water Column in the Slope Area of the Southern Basin of Lake Baikal in the 21st Century // Water. 2022. V. 14. № 348.
 9. Блинов В.В., Гранин Н.Г., Мизандронцев И.Б., Гнатковский Р.Ю., Жданов А.А. Сезонные изменения вертикальной структуры водной толщи пелагиали Южного Байкала // Водные ресурсы. 2017. Т. 44. Вып. № 3. С. 285–295.
 10. Grebenshchikova V.I., Kuzmin M.I., Suslova M.Yu. Long-term cyclicity of trace element in the Baikal aquatic ecosystem (Russia) // Environmental Monitoring and Assessment. 2021. V. 193. Art. 260.
 11. Skuzovatov S.Yu., Belozerova O.Yu., Vasil'eva I.E., Zarubina O.V., Kaneva E.V., Sokolnikova Yu.V., Chubarov V.M., Shabanova E.V. Centre of Isotopic and Geochemical Research (IGC SB RAS): Current State of Micro- and Macroanalysis // Geodynamics & Tectonophysics. 2022. V. 13. № 2. Art. 0585.
 12. ГН 2.1.5.2280-07 Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования: Гигиенические нормативы. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2008. 11 с.
 13. Рихванов Л.П., Страховенко В.Д., Смирнов С.З., Литасов Ю.Д., Кулинич Е.А. Уникальный минерал надгруппы пирохлора из Прибайкалья (дополнение его первого описания, сделанного В.И. Вернадским) // Записки Российского минералогического общества. 2018. Т. 147. № 6. С. 75–89.
 14. Alexeeva L.P., Alexeev S.V., Sholokhov P.A., Kononov A.M. Monitoring of Groundwater Quality in Listvyanka Settlement (Southwest Coast of Lake Baikal) // Geodynamics & Tectonophysics. 2023. № 14. Т. 2. Art. 0697.
 15. Рампилов М.О., Punн Г.С. Редкометалльная минерализация альбитовых гранитов Западного Забайкалья. // Литосфера. 2019. Т. 19. № 4. С. 598–614.
 16. Склярова О.А. Распределение микроэлементов в водной толще среднего Байкала // География и природные ресурсы. 2011. № 1. С. 53–59.
 17. Гребенщикова В.И., Кузьмин М.И. Циклически-волновой характер распределения химических элементов в воде истока р. Ангара (сток Байкала) // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2022. Т. 505. № 2. С. 199–206.
 18. Батурун Г.Н. Распределение элементов в железомарганцевых конкрециях морей и озер // Литология и полезные ископаемые. 2019. № 5. С. 404–417.
 19. Rasskazov S.V., Ilyasova A.M., Chuvashova I.S., Bornyakov S.A., Orgilyanov A.I., Kovalenko S.N., Seminsky A.K., Popov E.P., Chebykin E.P. Hydrogeochemical zoning of uranium isotopes (234U/238U) in the Southern Siberian paleocontinent: the role of the South Baikal reservoir in the groundwater formation // Geodynamics & Tectonophysics 2020. V. 11. № 3. P. 632–650.

URANIUM IN THE WATER OF THE BAIKAL ECOSYSTEM

V. I. Grebenshchikova^{a, #}, Academician of the RAS M. I. Kuzmin^a, and V. M. Demjanovich^b

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

^bInstitute of the Earth Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation

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

The analysis of distribution of uranium concentrations in the water of conjugated components of Baikal ecosystem in the water of Baikal, tributaries, Angara headwaters and in underground water from the wells on Olkhon island and in south-western coastal part of Baikal has been carried out. The significant differences of the maximum uranium contents in the ground water of the Baikal and its inflows and the close average and median values of the element in the water of the Baikal and the Angara River flowing into it were determined. The data on uranium distribution fix the influence of geological and geochemical peculiarities of the structure of the Baikal ecosystem and its surroundings and the climatic and catastrophic (earthquakes, seismogeodynamic activation etc.) events which take place in the region. An analysis of changes in the concentration of uranium in the water of Lake Baikal in relation to the seismic process was carried out on the example of strong earthquakes ($M \geq 5$) in the region of Lake Baikal.

Keywords: uranium, water, Baikal, tributaries, wells, Angara source