

ПРОБЛЕМЫ ВОД СУШИ

УДК 550.4:502.175(571.53)

**ЦИКЛИЧЕСКИ-ВОЛНОВОЙ ХАРАКТЕР РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ВОДЕ ИСТОКА
р. АНГАРЫ (СТОК БАЙКАЛА)**

© 2022 г. В. И. Гребенщикова^{1,*}, академик РАН М. И. Кузьмин¹

Поступило 11.02.2022 г.
После доработки 11.04.2022 г.
Принято к публикации 18.04.2022 г.

Установлен циклически-волновой характер изменения химического состава воды р. Ангары — стока озера Байкал, указывающий на наличие эффекта долговременной памяти в химических временных рядах элементов. Эффект заключается в том, что текущие значения контролируемых элементов в воде истока Ангары зависят и от их прошлых значений, но могут резко изменяться при катастрофических нарушениях окружающей среды за счет природных и антропогенных катаклизмов. Полученные данные основаны на многолетних (1950–2020 гг.) мониторинговых исследованиях химического состава воды Байкальской экосистемы.

Ключевые слова: Байкальская водная экосистема, химический состав воды, волновая цикличность, эффект долговременной памяти, сопряженность составов

DOI: 10.31857/S2686739722080084

Крупнейшее в России озеро Байкал содержит 20% мировых запасов питьевой воды и включено ЮНЕСКО в объекты Всемирного природного наследия. В Байкал впадает более 360 рек и речек, а вытекает только одна Ангара. Водосборный бассейн оз. Байкал сложен различными по составу и возрасту породами с рудопроявлениями и месторождениями полезных ископаемых, а также источниками воды разного минерального состава [1, 2]. В притоках Байкала распространены различные типы вод по их преобладающему питанию.

Озеро расположено в Байкальской рифтовой зоне (рис. 1), где часто происходят землетрясения и геодинамические подвижки [3].

Исследователями Байкала доказано внутривекровое изменение климата и уровня воды Байкала, установлены горизонтальное движение в нем поверхностных вод против часовой стрелки и более сложное перемещение в трех его котловинах. Возможность динамического поднятия глубинных вод в Байкале высказывалась ранее [4]. Подъем глубинных вод и опускание поверхностных вод вдоль берегов доказываются научными исследованиями [5].

В зимнее время Байкал замерзает, но в нем установлено наличие подледного термоклина, откуда вода поступает в исток р. Ангары, не замерзающий в течение года. Это обстоятельство позволяет проводить опробование воды истока в любое время года, выполняя многолетний геохимический мониторинг. Температура воды в истоке реки Ангара может изменяться от -1 до $+14^{\circ}\text{C}$, иногда более.

О.В. Гагаринова [7], рассматривая Байкальскую водную экосистему, отмечает ее способность к самоочищению.

Целью данной работы является объяснение возможных причин ежегодных изменений химического состава воды истока реки Ангары (сток Байкала), происходящих за последние 70 лет (для макрокомпонентов) и за последние 15 лет (для микрокомпонентов). Достижению поставленной цели способствует ежегодный (ежемесячный в течение года) мониторинг состава воды истока Ангары. Важной фундаментальной задачей являются сравнение и выявление причин происходящих изменений макро- и микроэлементного состава воды Ангары.

Ранее в ИГХ СО РАН выполнен сравнительный анализ опубликованных литературных данных (1950–1995 гг.) и собственной аналитической информации (1997–2013 гг., 2017–2020 гг.) [6, 8, 9] для выявления возможных изменений состава воды истока Ангары. С 2006 г. одновременно проводится ежемесячный анализ воды на макро- и

¹ Институт геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия
**e-mail:* vgreb@igc.irk.ru

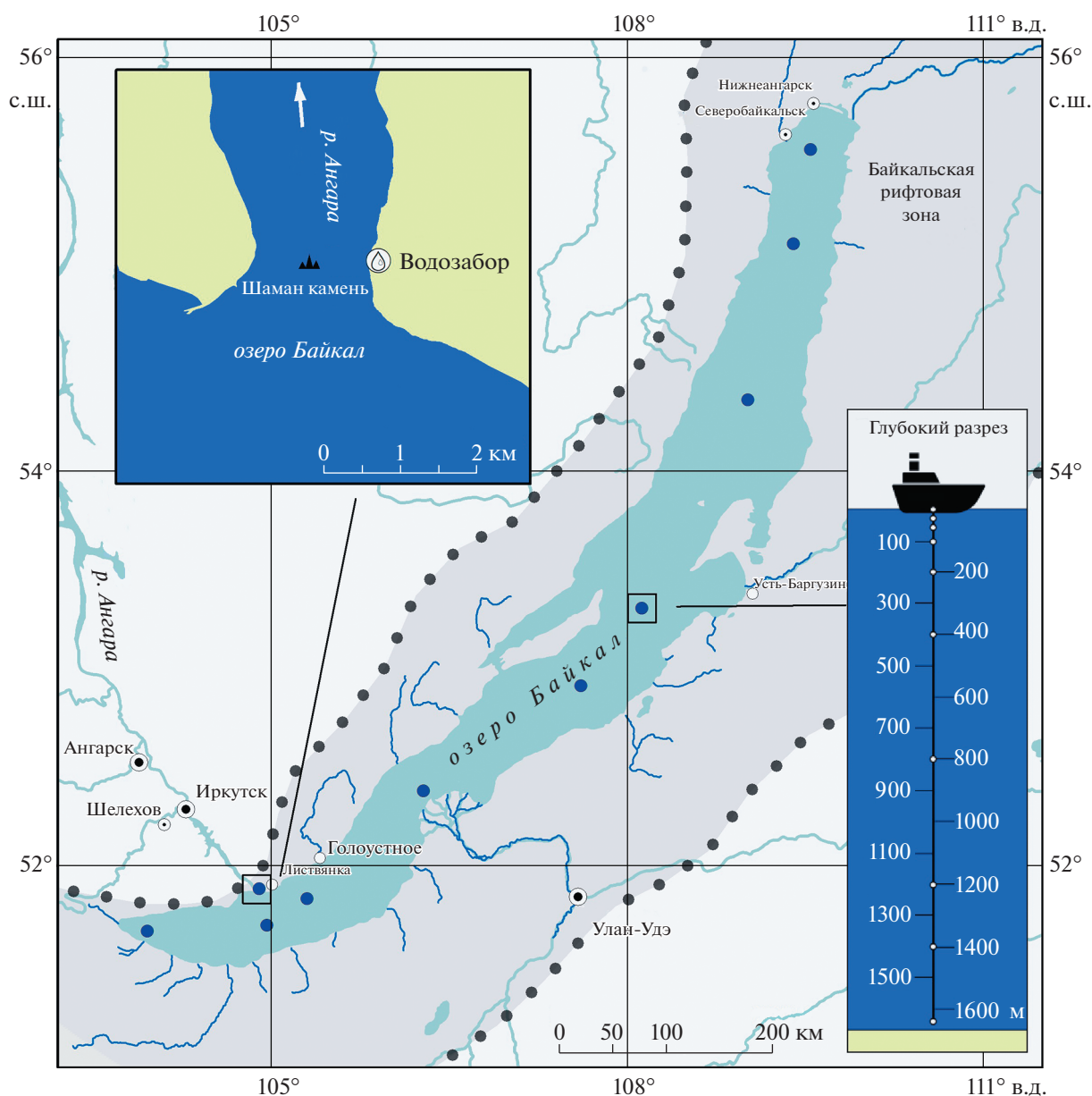


Рис. 1. Схема отбора проб воды Байкальской водной экосистемы (исток Ангары, поверхностная и глубинная вода Байкала) для проведения химического анализа [6].

микрокомпоненты. В 2014–2016 гг. геохимический мониторинг воды был временно приостановлен, а в 2017–2020 г. вновь возобновлен.

Вода Ангары отбиралась в береговой части с глубины около 2 м. Поверхностная и глубинная вода Байкала отбиралась весной и осенью. Химический анализ воды проводился с использованием научного оборудования аккредитованного и сертифицированного аналитического центра «Изотопно-геохимические исследования» Института геохимии СО РАН. Микроэлементы (Al, Be, Li, F, Zn, Pb, Cu, Ni, Co, Cr, V и др.) определены методом масс-спектрометрии с индуктивно-

связанной плазмой (ELEMENT 2, «Finnigan MAT», Германия).

Анализы на ряд элементов (K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}), анионы и другие показатели воды осуществляли по общепринятым методикам. При расчете общей минерализации (TDS) учитывается сумма катионов и анионов. Во всех пробах воды определяли растворенный кислород, pH и TDS.

Анализ проб на ртуть выполнялся атомно-абсорбционным методом, анализатор ртути РА-915М с приставкой РП-92.

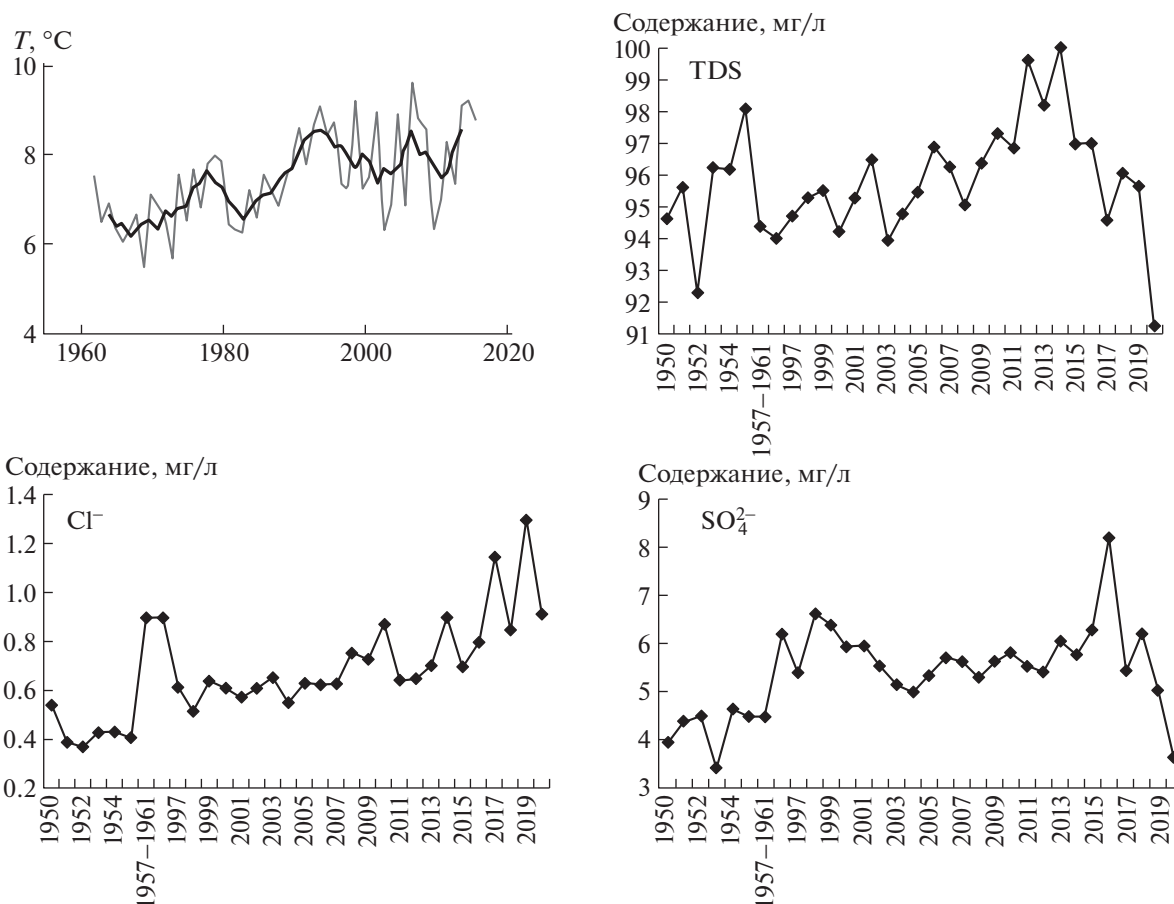


Рис. 2. Средняя годовая температура поверхности воды в 1960–2016 гг. в истоке Ангары (тонкие линии) и ее пятилетнее скользящее среднее значение (жирные линии) [10] и среднегодовые значения состава воды (TDS, Cl^- , SO_4^{2-}) истока р. Ангары в 1950–2020 гг. (по авторским и литературным данным [8, 11]).

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ВОДЫ В ИСТОКЕ АНГАРЫ

Исследование годовых температур поверхностной воды в истоке Ангары [10] показало закономерность изменения в 1960–2016 гг. с постепенным увеличением от 0.5 до 1.5 градусов (рис. 2) и образованием положительного температурного цикла. В 2014–2016 гг. уровень воды в Байкале соответствовал экстремально низким условиям водности. По данным Росгидромета за период весеннего половодья приток воды в оз. Байкал был минимальным за эти годы [11]. Отмечались высокие температуры воздуха, воды выше 8°C в истоке Ангары, отсутствие или низкое количество атмосферных осадков, частые пожары вокруг Байкала. На реках, впадающих в Байкал, наблюдалась низкая межень.

В 2017–2020 гг. средняя годовая температура воды истока Ангары по нашим данным понизилась до $4\text{--}5^\circ\text{C}$, уровень Байкала повысился, отмечались подтопления в его береговой зоне, во многих притоках и реке Ангаре. Уменьшение темпе-

ратуры воды в истоке может быть обусловлено подъемом более холодной глубинной воды Байкала во время частых землетрясений в последние годы.

МАКРОКОМПОНЕНТНЫЙ СОСТАВ ВОДЫ

Данные по макрокомпонентному составу, полученные в последние годы, подтверждают низкую TDS и бикарбонатно-кальциевый состав воды Байкала и истока Ангары (рис. 2). Средняя TDS воды истока в 2017 г. составляла 94.61 (86.7–98.96), в 2018 г. – 95.59 (91.04–101.7) мг/л и в 2019 г. – 95.64 (92–97.9) мг/л. В 2020 г. произошло заметное снижение TDS – 91.25 (76.5–101.4) мг/л. Ранее такая низкая TDS в воде истока Ангары отмечалась в 1952 г. Одновременно в последние годы заметно уменьшилось значение SO_4^{2-} , HCO_3^- , незначительно увеличились концентрации хлорид-иона. Следует отметить, что в 1952–1956 гг. проходило строительство Иркутской ГЭС на р. Ангаре в 65 км от ее истока (район г. Иркутска),

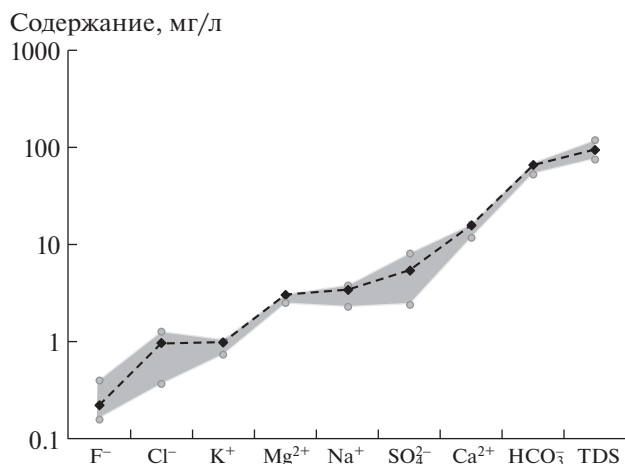


Рис. 3. Распределение ионов и минерализации в воде Байкальской экосистемы: минимальное—максимальное (заштриховано) содержание в поверхностной и глубинной воде Байкала в 2011–2020 гг. и среднее содержание компонентов в воде истока Ангары в 2017–2020 гг.

понижился уровень Байкала, отмечалось одновременно уменьшение TDS, сульфат- и гидрокарбонат ионов.

Циклично-волновое изменение TDS воды в Ангаре с постепенным незначительным нарастанием значений отмечалось с 1950 г. до 2016 г. (рис. 2). Эти данные коррелируют с температурными циклами изменения воды и с последовательным увеличением среднегодовых температур [10]. Общая средняя годовая TDS воды истока фиксирует длительный восходящий природный цикл изменений с 1950 до 2017 г. (рис. 2).

В 2017 г. заканчивается положительная направленность циклично-волнового распределения концентраций макрокомпонентов в воде, начинается снижение концентраций главных ионов и TDS. Эти тренды также имеет циклично-волновой характер, когда имеются годовые сезонные изменения, соответствующие времени года (рис. 2), минерализация уменьшается в летнее время и увеличивается в холодное время года. Если предыдущие годы (2017–2018 гг.) в Прибайкалье еще были относительно засушливые и пожароопасные, то в 2019–2020 гг. на реках в Байкальской экосистеме отмечались серьезные наводнения и подтопления, однако катастрофических изменений в химическом составе воды истока и Байкала не отмечалось.

Анализ информации по изменению концентраций ионов и TDS в воде Ангары за последние 70 и 24 года (рис. 2) показал, что годовые циклы изменчивости могут длиться более 10 лет, чем предполагалось ранее [8]. В дополнение к длительным циклам могут происходить ежемесячные волновые (сезонные) изменения минерализации

воды, обусловленные какими-либо кратковременными природными явлениями (катаклизмами). В целом низкая минерализация (76–110 мг/л, в среднем примерно на уровне 100 мг/л) воды истока Ангары сохраняется уже 70 лет — 1950–2020 гг. Заметные изменения, т.е. понижение минерализации, или новый геохимический цикл, наметился с 2017 г., что также может являться результатом влияния различных факторов, в первую очередь климатических и гидродинамических.

Концентрации азотсодержащих ионов в поверхностных водах истока подвержены заметным сезонным колебаниям: они минимальны в вегетационный период с ростом фитопланктона и, как правило, содержания их начинают расти осенью и достигают максимумов зимой. Начиная с 2018 г., содержания NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+ заметно повышались летом и осенью в истоке Ангары. Это коррелируется с увеличением числа туристов и интенсивным сбросом сточных вод с туристических баз и гостиниц в юго-западной части Байкала (пос. Листвянка). В 2020 г. содержания азотсодержащих компонентов заметно уменьшились из-за меньших сбросов сточных вод в период пандемии.

В последние годы, на фоне снижения значений TDS и главных ионов, отмечается незначительное повышение концентраций хлор- и фтор-ионов в воде истока. Повышение их содержаний обнаруживается весной, когда оз. Байкал освобождалось от снега и льда, и эта тающая масса поступала в исток Ангары. Возможно, что сказывается и антропогенное влияние на воду истока огромного количества туристов в последние годы.

В воде Байкала и Ангары много кислорода (8–14, реже до 19 мг/л), что делает воду вкусной и приятной для употребления. Повышенные содержания кислорода (>12 мг/л) в воде истока были отмечены в течение 2018 г. Обычно его содержание уменьшается в летнее время в связи с бурным развитием фито- и зоопланктона.

Полученные среднегодовые данные по макроэлементному составу воды истока Ангары в 1950–2020 гг. ниже предельно допустимых концентраций не только питьевой воды [12], но и воды рыбохозяйственных водоемов. Последние химические данные по воде истока Ангары и Байкала (рис. 3) близки между собой. Это означает, что, в целом, воды Ангары и Байкала сохраняют свою чистоту, что крайне важно как для человека, так и для биоты.

МИКРОЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ ВОДЫ

Содержание микроэлементов в воде Байкала и Ангары в целом довольно низкое. Концентрации многих микроэлементов (например, Be, Sn, Sb, Co, Pb, некоторые РЗЭ и др.) часто бывают ниже

предела обнаружения метода ICP–MS. Резкие повышения содержаний элементов из этой группы не всегда удается объяснить. Конечно, есть природные факторы, которые уже отмечались, – поступление элементов из вмещающих Байкал пород при их дренировании многочисленными притоками, влияние минеральных источников на берегах озера, таяние снегового покрова на Байкале, возрастающий туристический поток и др.

К микроэлементам, содержания которых могут часто повышаться в воде Байкала и истока Ангары более, чем в 10 раз, относятся Fe, Mn, Hg, Al, Be, Zn, Pb, Cd [6]. Различия в концентрациях остальных элементов менее контрастны (рис. 4). Рассмотрим возможные причины волатильности концентраций некоторых элементов.

Породообразующие элементы (Si, K, Na, Sr, Ba и др.) могут выщелачиваться из коренных пород водосборного бассейна Байкала, имеющих разный состав (от основных до кислых). Дренаж пород, выщелачивание некоторых элементов и растворение их в воде лишь кратковременно обогащают воду литоральных частей Байкала, выравнивание их содержаний затем происходит по всему Байкалу за счет системы течений.

Резкие повышения содержаний Fe и Mn в воде истока Ангары и Байкала (рис. 4) можно объяснить наличием в донных осадках Байкала большого количества железомарганцевых конкреций, содержащих минералы-спутники с повышенными концентрациями Zn, Ni, Co, Cu. Эти минералы могут растворяться в восстановленных осадках вблизи редокс-границы [13] и обогащать не только поровые воды, но и воду Байкала, а затем соответственно воду истока Ангары. Такие процессы могут быть мобилизованы при геодинамических подвижках и землетрясениях, штормах и других аномальных природных процессах на Байкале.

Содержания Be в воде Байкала и истока довольно низкие, но в воде литорали в северо-западной части Байкала и в устье его притока р. Рель концентрации бериллия иногда бывают значительно повышены. Здесь также увеличивается сумма редкоземельных элементов, фтора и тория. Река Рель дренирует массив гранитов [1, 2], которые могут быть источником поступления перечисленных элементов в воду при их разрушении и выщелачивании.

Другим примером влияния вмещающих коренных пород на воду Байкала и истока являются относительно повышенные концентрации в воде урана в некоторых притоках Байкала и в его литоральной зоне. В притоках в районе г. Слюдянка, побережья Тажеранской степи и на острове Ольхон в породах было подтверждено нахождение урансодержащего минерала – менделеевита [14].

Стоит учитывать воздействие на воду Байкала и истока Ангары имеющихся вокруг Байкала хо-

лодных и горячих источников с повышенными содержаниями некоторых ионов и микроэлементов, влияние которых рассматривается как природное загрязнение воды Байкала [1]. Такие источники имеют значительно более высокие концентрации SO_4^{2-} , Cl^- , F^- , Na и Si, чем в озерной воде, а также в десятки раз больше обогащены Li, Rb, Cs, Ga, As, W. Высокие концентрации Co, Ni, Zn и Cd предполагают наличие в районах их нахождения на глубине сульфидной минерализации и ее дренаж термальными водами.

Ранее П.В. Коваль и соавт. [15] отмечали кратковременное экстремальное повышение концентраций Hg в воде Ангары во время землетрясений, превышающее предельно допустимую концентрацию рыбохозяйственным водоемов, которое называли “ртутным дыханием Байкала”. Такое явление относится к разряду природных катаклизмов и было подтверждено позднее нашими исследованиями [6, 16].

Вероятны природно-антропогенные причины изменения концентраций микроэлементов. В частности, это использование местным населением угля Иркутского угольного бассейна, содержащего повышенные концентрации Pb, Zn, Cu, U, Hg и других токсичных элементов [17]. После сгорания угля эти элементы с продуктами сгорания выпадают на снеговой покров озера, а при таянии снега поступают в воду Байкала и истока Ангары. Другими причинами могут быть автотранспорт и нарастающий туристический поток. Предполагается влияние ближайших промышленных предприятий (алюминиевый завод в 50 км – г. Шелехов и многочисленные предприятия в г. Улан-Удэ и на берегах р. Селенги) за счет атмосферного переноса токсикантов (рис. 4, 5). Средние содержания Ni, Zn, а также Fe, Y, Cd, Co в воде истока бывают иногда существенно выше, чем в воде Байкала. На воду Ангары оказывает негативное влияние ближайший к истоку туристический пос. Листвянка [18].

Установленные особенности распределения макро- и микроэлементов в воде Байкальской экосистемы свидетельствуют о существовании временных (волновых, сезонных) и долговременных (циклических, годовых) изменений состава воды истока Ангары. Такое распределение элементов в истоке Ангары указывает на формирование протяженных межгодовых циклов, внутри которых отмечаются менее протяженные волны концентраций (минимум–максимум–минимум), т.е. существуют временные ряды волновой динамики в показателях химического состава воды – повторение данных. По макрокомпонентам в воде истока довольно отчетливо проявляется фрактальность (самоподобие) в период исследований. При этом сохраняются средние значения ионов, с одной стороны, и отмечается постепенное умень-

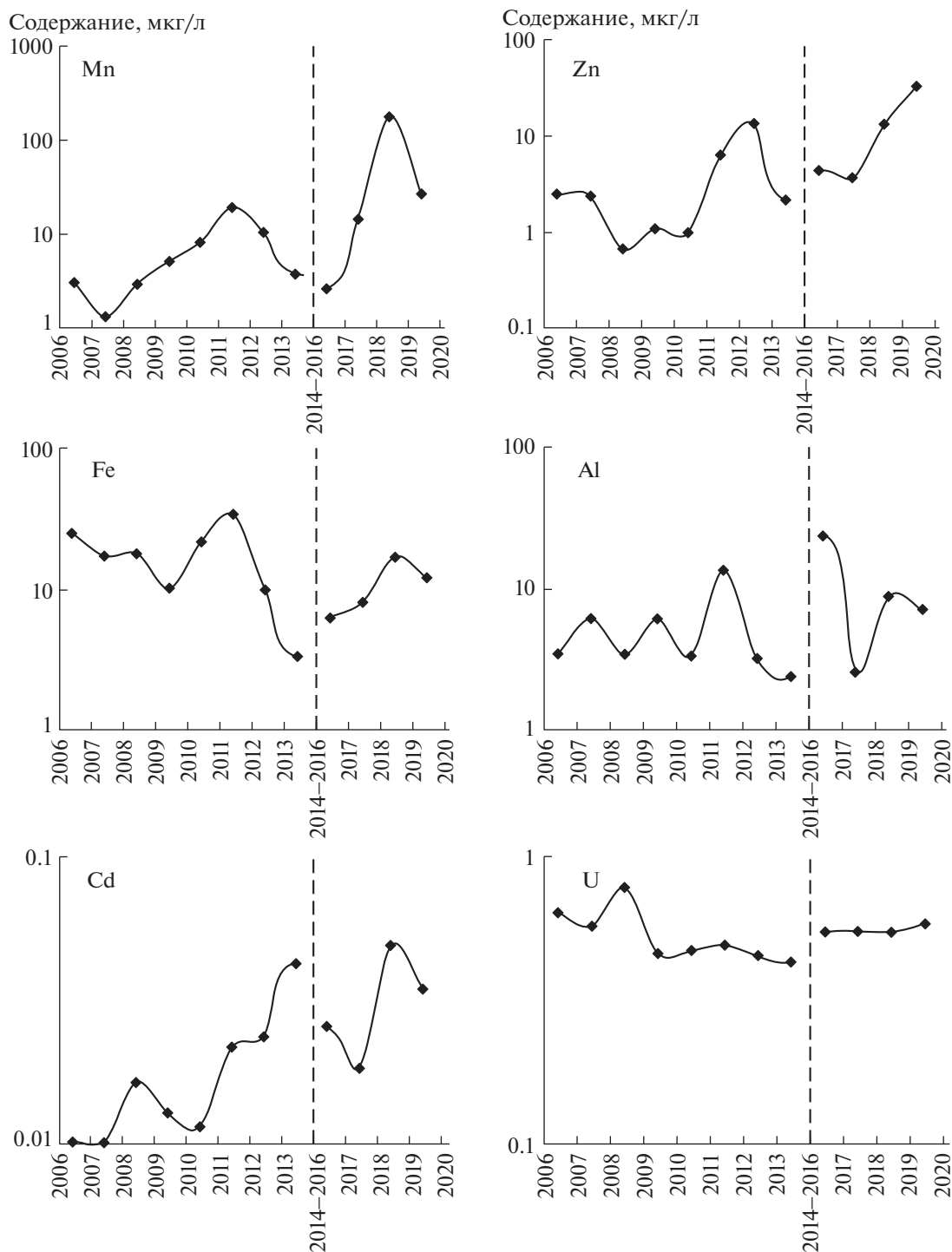


Рис. 4. Среднее годовое распределение значений микроэлементов в воде истока Ангары в 2006–2020 гг. (вертикальный пунктир – отсутствие данных).

шение или увеличение содержаний элементов в динамике со временем. Исследователи называют такое явление эффектом памяти [19], наблюдаемым во временных рядах, что представляется следствием упорядоченной регулярности, которая частично проявляется в наличии водно-экологической фрактальности (самоподобные циклы).

Большую роль в изменении состава воды имеет гидродинамическая структура водного потока, что определяется различными препятствиями на его пути (например, каким-либо природным – геохимическим или природно-техногенным барьером). Ю.Д. Чашечкин, О.М. Розенталь [20] экспериментально показали влияние на измене-

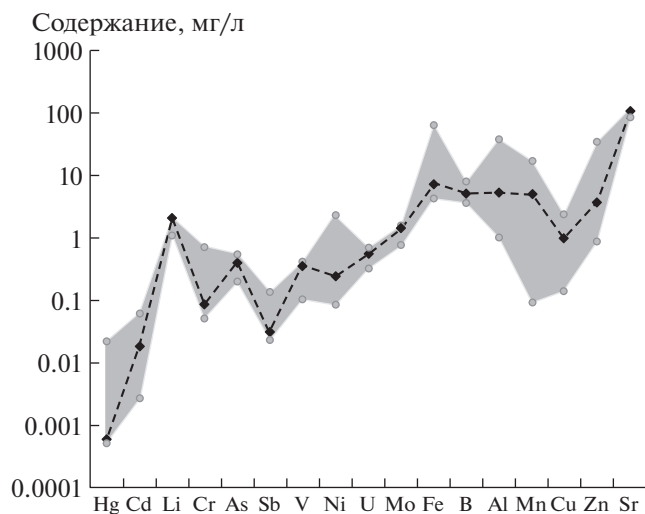


Рис. 5. Распределение микроэлементов в воде Байкала в 2011–2020 гг. (заштрихованная область — минимальное–максимальное содержание) и среднее содержание в воде истока Ангары в 2017–2020 гг. (пунктир).

ние концентрации элемента в воде потока после преодоления какого-либо препятствия. В данном случае таким препятствием является уступ в береговой части Байкала глубиной до 400 м, откуда вода поступает в исток Ангары. Точно также могут влиять на химический состав воды Байкала и истока, впадающие боковые притоки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что происходящие изменения в концентрациях элементов в воде истока Ангары могут быть обусловлены сезонными и годовыми климатическими изменениями и гидродинамическими особенностями.

Волновое распределение макроэлементов четко отражает сезоны года, а циклически-волновое распределение представляет характеристику годовых изменений, отражает гидрологический режим водного объекта — засуху, потепление, пожары, ураганы, шторма или серьезные наводнения и подтопления в береговой зоне. Соответственно имеется или положительный цикл на протяжении засушливых лет, или отрицательный при похолодании и подтоплениях, либо близкие значения элементов при нормальном гидрологическом режиме.

Распределение микроэлементов в воде Байкала и истока Ангары в большей степени зависит от состава вмещающих пород, разрушения на дне Байкала Fe–Mn-конкреций, частых землетрясений и поступлений ртути, подъема глубинных вод и опускания загрязненных литоральных вод, вли-

яния промышленных объектов, туристического бизнеса и т.д.

Установленный циклически-волновой характер изменения химического состава р. Ангары — стока оз. Байкал, указывает на наличие эффекта долговременной памяти во временных рядах химических элементов. Эффект заключается в том, что текущие значения контролируемых элементов в воде истока зависят и от их прошлых значений, но могут резко изменяться при нарушениях в экосистеме Байкала, обусловленных природными и антропогенными катаклизмами. Однако за счет процессов самоочищения в байкальской воде первоначальное состояние водной системы способно быстро восстанавливаться, достигая прежних (средних) значений химических параметров или образуя самоподобные циклы, проявляющиеся во временной динамике.

Сравнительный анализ химического состава водной экосистемы Байкала, в которую входят поверхностная, глубинная вода Байкала, а также вода истока реки Ангары, указывает на отчетливую сопряженность их составов и общее происхождение. Полученные за последние годы значения по среднему составу воды Байкала и истока Ангары не превышают предельно допустимых концентраций для питьевых вод и воды рыбохозяйственных водоемов. Необходимо дальнейшее изучение уникального процесса самоочищения воды в Байкале, чтобы понять происходящие в нем изменения во времени.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИГХ СО РАН № 0284-2021-0003 и при поддержке проекта РФФИофи_м № 17-29-05022.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

У авторов нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sklyarov E.V., Sklyarova O.A., Lavrenchuk A.V., Menshagin Yu.V. Natural Pollutants of Northern Lake Baikal // *Environ Earth Sci*. 2015. V. 74. P. 2143–2155.
2. Sklyarova O.A., Sklyarov E.V., Och L., Pastukhov M.V., Zagorulko N.A. Rare earth Elements in Tributaries of Lake Baikal (Siberia, Russia) // *Applied Geochemistry*. 2017. V. 82. 164–176.
3. Ключевский А.В., Гребенщикова 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.
4. Диденков Ю.Н., Бычинский В.А., Ломоносов И.С. О возможности существования эндогенного источника пресных вод в рифтовых геодинамических

- условиях // Геология и геофизика. 2006. Т. 47. № 10. С. 1114–1118.
5. Шимараев М.Н., Троицкая Е.С., Блинов В.В. и др. Об апвеллингах в озере Байкал // ДАН. 2012. Т. 442. № 5. С. 696–700.
 6. 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. 193:260.
 7. Гагарина О.В. Устойчивость природных вод бассейна озера Байкал к антропогенным воздействиям // География и природные ресурсы. 2015. № 1. С. 46–54.
 8. Гребенщикова В.И., Кузьмин М.И., Пройдакова О.А., Зарубина О.В. Многолетний геохимический мониторинг истока реки Ангары (сток озера Байкал) // ДАН. 2018. Т. 480. № 4. С. 449–454.
 9. Grebenshchikova V.I., Kuzmin M.I., Doroshkov A.A., Proydakova O.A., Tsydyrova S.B. The Cyclicity in the Changes in the Chemical Composition of the Water Source of the Angara River (Baikal Stock) in 2017–2018 in Comparison with the Last 20 Years of Data // Environmental Monitoring and Assessment. 2019. V. 191. P. 728.
 10. Шимараев М.Н., Троицкая Е.С. Тенденции изменения температуры верхнего слоя воды на прибрежных участках Байкала в современный период // География и природные ресурсы. 2018. № 4. С. 95–104.
 11. Государственный доклад “О состоянии озера Байкал и мерах по его охране в 2016 году”. Иркутск: ИНЦХТ. 2017. 374 с. ISBN 978-5-98277-243-5.
 12. Контроль химических и биологических параметров окружающей среды. Под редакцией Исаева Л.К. СПб. Эколого-аналитический информационный центр “Союз”. 1998. 896 с.
 13. Гранина Л.З. Ранний диагенез донных осадков озера Байкал. Новосибирск: изд-во “Гео”. 2008. 160 с.
 14. 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.
 15. Коваль П.В., Удодов Ю.Н., Андрулайтис Л.Д. и др. Ртуть в воде истока р. Ангары // ДАН. 2003. Т. 389. № 2. С. 235–238.
 16. Гребенщикова В.И., Кузьмин М.И., Ключевский А.В., Демьянович В.М., Ключевская А.А. Повышенные содержания ртути в воде истока реки Ангары: отклики на геодинамические воздействия и сильные землетрясения // ДАН. 2020. Т. 491. № 2. С. 77–81.
 17. Гребенщикова В.И., Грицко П.П., Кузнецов П.В., Дорошков А.А. Уран и торий в почвенном покрове Иркутско-Ангарской промышленной зоны (Прибайкалье) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 7. С. 93–104.
 18. Сутурин А.Н., Чебыкин Е.П., Мальник В.В. и др. Роль антропогенных факторов в развитии экологического стресса в литорали озера Байкал (акватория пос. Листвянка) // География и природные ресурсы. 2016. № 6. С. 43–54.
 19. Розенталь О.М., Тамбиева Дж.А. Волновая динамика качества речной воды // ДАН. Науки о Земле. 2020. Т. 491. № 1. С. 82–86.
 20. Чашечкин Ю.Д., Розенталь О.М. Физическая природа неоднородности состава речных вод // ДАН. 2019. Т. 484. № 5. С. 83–86.

CYCLIC-WAVE CHARACTER OF THE DISTRIBUTION OF CHEMICAL ELEMENTS IN THE WATER OF THE SOURCE OF THE ANGARA (BAIKAL DRAIN)

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

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

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

The cyclic-wave character of the change in the chemical composition of the Angara River – the runoff of Lake Baikal, indicating the presence of the effect of long-term memory in the chemical time series of elements, has been established. The effect is that the current values of the controlled elements in the water of the source of the Angara depend on their past values, but can change dramatically in case of catastrophic violations due to natural and anthropogenic disasters. The data obtained are based on long-term (1950–2020) monitoring studies of the chemical composition of the Baikal ecosystem.

Keywords: Baikal ecosystem, chemical composition of water, wave cyclicity, long-term memory effect, conjugation of compositions