

УДК 550.4:502.175(571.53)

РАЗНОНАПРАВЛЕННАЯ ДИНАМИКА ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВОДЫ БАЙКАЛЬСКОЙ ЭКОСИСТЕМЫ (Байкал, притоки, исток р. Ангара)

В.И. Гребенщикова¹, М.И. Кузьмин¹, В.М. Демьянович²

¹Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1а, Россия

²Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

Установлена разнонаправленная динамика изменения химического состава воды единственного стока о. Байкал — р. Ангара. Выявлен циклическо-волновой характер изменения межгодового химического состава байкальской воды, что свидетельствует о наличии эффекта долговременной памяти в химических временных рядах элементов. Проявлены положительные и отрицательные температурные и химические тренды состояния воды истока Ангары, обусловленные изменением климата, влиянием приуроченности Байкала к рифтовой зоне, составом вмещающих пород. Показано, 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 катализмов (пожары, засуха, наводнения, землетрясения и др.). Прослежена связь между повышенными значениями урана в воде с сейсмическим процессом в районе озера Байкал. Полученные данные основаны на многолетних (1950—2021 гг.) мониторинговых исследованиях химического состава воды сопряженных компонентов Байкальской экосистемы (вода Байкала, притоки, исток Ангары).

Байкальская водная экосистема, химический состав воды, цикличность, геодинамика, эффект долговременной памяти, сопряженность составов

DIFFERENT DYNAMICS OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF WATER IN THE BAIKAL ECOSYSTEM (*Baikal, Its Tributaries, and the Source of the Angara River*)

V.I. Grebenzhikova, M.I. Kuzmin, V.M. Demyanovich

Multidirectional dynamics of changes in the chemical composition of the water of the only runoff of Lake Baikal, the Angara River, has been established. The cyclic-wave change in the interannual chemical composition of the Baikal water has been revealed, which indicates a long-term memory effect in the chemical time series of elements. Positive and negative temperature and chemical trends in the state of the water in the source of the Angara are observed, which are due to climate changes, the confinement of Baikal to the rift zone, and the composition of the enclosing rocks. It is shown that the current concentrations of monitored elements in the Angara source water depend also on their past concentrations but can change dramatically in the case of catastrophic environmental disturbances caused by natural and anthropogenic disasters (fires, drought, floods, earthquakes, etc.). The relationship between the elevated concentrations of uranium in the water and the seismic process in the Baikal area has been traced. The data obtained are based on the long-term (1950–2021) monitoring of the chemical composition of water in the Baikal ecosystem (Baikal, its tributaries, and Angara source).

Baikal water ecosystem, chemical composition of water, cyclicity, geodynamics, long-term memory effect, conjugation of compositions

ВВЕДЕНИЕ

В XXI столетии многие территории мира (Африка, Южная Азия, Ближний Восток и др.) испытывают дефицит чистой питьевой воды [Lackner et al., 2020], в последние годы это проблема характерна и для европейских стран. Такая ситуация заставляет задуматься о сохранении уже имеющихся запасов воды на Земле.

Крупнейшее в России оз. 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. Изучением химического состава и качества Байкальской водной экосистемы (Байкал, притоки, исток Ангары) занимались многие ученые не только из России: это работы Бочкирева П.Ф., Вотинцева К.К., Глазунова И.В., Николаевой М.Д., Тарасовой Е.Н., Шпейзера Г.М., Ветрова В.А., Кузнецовой А.И., Грачева М.А., Ломоносова И.С. и многих других исследователей, информация которых использована в наших ранних публикациях [Гребенщикова и др., 2011, 2013], но и других стран: Япония, Франция, Польша и другие [Falkner et al., 1991, 1997; Hachikubo et al., 2010; Perrot et al., 2010; Ciesielski et al., 2010; и др.].

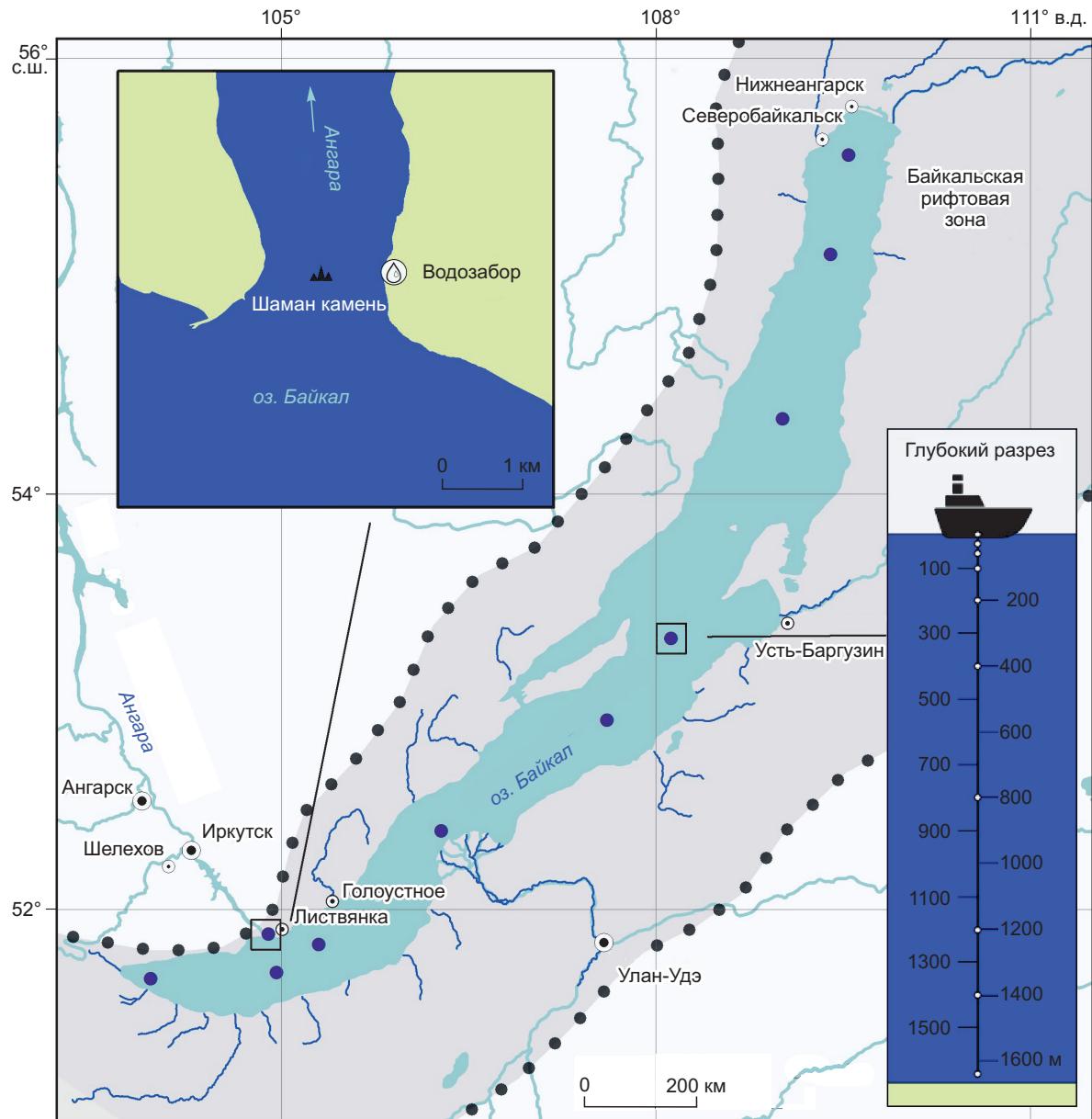


Рис. 1. Схема отбора проб воды Байкальской водной экосистемы (исток Ангары, поверхностная и глубинная вода Байкала) для проведения химического анализа [Grebenshchikova et al., 2021].

Озеро расположено в Байкальской рифтовой зоне (рис. 1), где часто происходят землетрясения и геодинамические подвижки [Ключевский и др., 2021]. Средняя мощность земной коры под котловиной оз. Байкал составляет около 36 км, в Южно-Байкальской впадине установлена максимальная раздробленность фундамента разломами.

Водосборный бассейн оз. Байкал сложен различными по составу и возрасту породами сrudопроявлениями и месторождениями полезных ископаемых, а также представлен минеральными источниками воды разного состава [Гребенщикова и др., 2009; Байкаловедение..., 2012; Sklyarov et al., 2015; Sklyarova et al., 2017]. В притоках Байкала распространены различные типы вод по их преобладающему питанию [Семенов и др., 2019].

Исследователями Байкала доказано внутривековое изменение климата и уровня воды Байкала, установлено горизонтальное перемещение в нем поверхностных вод против часовой стрелки и более сложное (циклическое) перемещение в трех его котловинах. Возможность динамического поднятия глубинных вод в Байкале высказывалась ранее [Диденков и др., 2006]. Подъем глубинных вод и опускание поверхностных вод вдоль берегов (апвеллинг/даунвеллинг) доказывается научными исследованиями [Шимараев и др., 2012].

О.В. Гагаринова [2015, с. 47], рассматривая Байкальскую водную экосистему, отмечает, что способность водных объектов к самоочищению — «это уникальное природное явление, которое обусловлено целым рядом физических, химических и биологических процессов, способствующих нейтрализации загрязнителей, поступающих в водные объекты, и восстановлению первоначальных свойств и состава воды». Известным природным чистильщиком воды Байкала является ракушка епишур.

В последние годы число постоянно проживающего вокруг Байкала населения с учетом приезжающих туристов достигает более 2 млн человек. Такая нагрузка не поддерживается туристической инфраструктурой на современном уровне.

В зимнее время Байкал замерзает, но в нем установлено наличие подледного термоклина, откуда вода поступает в исток Ангары, незамерзающий в течение года [Блинов и др., 2017]. Это обстоятельство позволяет проводить опробование воды истока в любое время года, выполняя многолетний геохимический мониторинг.

Важной фундаментальной задачей является сравнение и выявление причин возможных изменений ионного и микроэлементного составов воды Ангары и Байкала.

Целью данной работы является объяснение возможных причин ежегодных значимых или незначительных изменений химического состава воды истока Ангары (сток Байкала), выявленные за последние 70 лет (для макрокомпонентов — 1950—2021 гг.) и за последние 15 лет (для микрокомпонентов — 2006—2021 гг.). Достижению поставленной цели способствует ежегодный (ежемесячный в течение года) мониторинг химического состава воды истока Ангары и мониторинг воды Байкала и притоков в теплое время года, так как зимой Байкал и притоки закрыты льдом и снегом. Данная публикация является продолжением многолетних геохимических исследований воды Байкальской экосистемы.

МЕТОДЫ ОПРОБОВАНИЯ И АНАЛИЗА

Ранее в Институте геохимии СО РАН выполнен сравнительный анализ опубликованных литературных данных (1950—1995 гг.) и собственной аналитической информации (1997—2013 гг., 2017—2020 гг.) [Ковалев и др., 2003, 2005; Grebenshchikova et al., 2021] для выявления возможных изменений химического состава воды истока Ангары. Анализ макрокомпонентного (ионного) состава воды истока Ангары проводится с 1997 г. С 2006 г. в истоке Ангары одновременно проводится ежемесячный анализ воды на макро- и микрокомпоненты. В 2014—2016 гг. геохимический мониторинг воды был временно приостановлен, а в 2017—2021 гг. возобновлен и продолжается в настоящее время. Вода истока Ангары отбиралась на удалении 2 м от берега, с глубины около 2 м. Для определения ионного состава воды пластиковую бутылку объемом 1.5 л тщательно промывали, затем заполняли водой, подписывали номер пробы и дату отбора. Вода не консервировалась, на микроэлементный анализ (ICP-MS) ее набирали шприцем, пропускали через белый мембранный фильтр с диаметром пор 0.45 мкм для отделения взвеси и наполняли водой стерильную пробирку объемом 10 мл. Добавляли в пробирку дозатором 0.3 мл концентрированной HNO_3 . Для определения ртути пластиковую бутылку объемом 1 л наполняли водой и добавляли в воду 2 мл серной кислоты (1:1) и 1 мл раствора перманганата калия.

В 2011, 2013, 2018—2020 гг. весной и осенью проводился отбор проб поверхностной и глубинной воды Байкала (см. рис. 1). За 1997—2021 гг. в ИГХ СО РАН отобрано и проанализировано 108 проб воды озера, более 500 проб воды истока Ангары (табл. 1, 2) и более 200 проб воды устьев некоторых притоков. Поверхностная вода отбиралась в разных местах в центральной части Байкала в разное время года. Глубинную воду чаще всего отбирали в центральной котловине с помощью батометра до глубины 1640 м (на рис. 1 справа белые точки), реже в южной котловине Байкала.

Химический анализ воды проводится с использованием научного оборудования аккредитованного и сертифицированного аналитического центра «Изотопно-геохимические исследования» Института геохимии СО РАН [Scuzovatov et al., 2022]. Правильность результатов концентраций F^- , Cl^- и других ионов подтверждена сравнением с данными, полученными методом капиллярного электрофореза [ПНД Ф 14.1:2:3. 101-97.., 2017; ПНД Ф 14.1:2:4.111-97.., 2011; ПНД Ф 14.1:2:3:4.282-18.., 2018].

Микроэлементы (Al, Be, Li, F, Zn, Pb, Cu, Ni, Co, Cr, V, U и др.) определялись методом масс-спектрометрии с индуктивно связанный 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. Во всех пробах воды определяли растворенный кислород, а также pH и общую минерализацию (TDS). При расчете TDS учитывается сумма катионов и анионов.

Анализ проб на ртуть выполнялся атомно-абсорбционным методом. Методика выполнения измерений массовой концентрации общей ртути в пробах природной, питьевой и сточной воды осуществлялась методом «холодного пара» на анализаторе ртути РА-915+ с приставкой РП-91 (издание 2004 года). Анализатор ртути РА-915М с приставкой: РП-92 — для определения массовой концентрации ртути в пробах природных, питьевых, минеральных, сточных вод.

Таблица 1. Ионный состав воды, pH и кислород в истоке Ангары (1997—2020 гг.) и в Байкале (поверхностная и глубинная вода), мг/л

Год	Na ⁺ + K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	TDS	O ₂	F ⁻	pH
Исток Ангары										
1997	4.33	15.06	3.33	65.98	0.62	5.40	94.73	12.25	0.23	—
1998	4.39	15.44	3.30	65.04	0.52	6.62	95.29	12.76	0.21	—
1999	4.26	15.51	3.57	65.15	0.64	6.40	95.54	13.43	0.20	—
2000	4.12	15.42	3.29	64.83	0.61	5.94	94.21	13.44	0.21	—
2001	4.11	15.73	3.35	65.57	0.58	5.97	95.30	13.01	0.20	—
2002	4.22	15.33	3.37	67.39	0.61	5.33	96.44	12.40	0.21	—
2003	4.03	15.17	3.16	65.56	0.60	5.16	93.95	10.18	0.21	—
2004	3.90	16.01	3.20	66.10	0.56	4.94	94.78	10.89	0.21	7.8
2005	3.80	15.73	3.40	66.40	0.63	5.32	95.47	10.14	0.20	—
2006	4.40	15.57	3.50	66.90	0.62	5.72	96.87	10.61	0.20	—
2007	4.40	15.25	3.40	66.70	0.63	5.31	96.27	11.41	0.19	7.1
2008	4.50	14.73	3.30	65.80	0.72	5.31	95.08	12.06	0.20	7.4
2009	4.70	14.99	3.30	66.50	0.73	5.65	96.37	14.41	0.19	7.4
2010	4.30	15.36	3.30	67.00	0.87	5.82	97.30	12.71	0.19	7.3
2011	4.50	15.30	3.20	67.40	0.64	5.54	96.90	11.34	0.19	7.1
2012	4.20	15.44	3.10	70.00	0.65	5.42	99.61	9.63	0.19	7.3
2013	4.30	15.10	3.40	68.10	0.70	6.00	98.25	11.10	0.19	7.8
1997—2013	4.20	15.44	3.34	66.12	0.62	5.68	95.63	11.81	0.20	7.3
2017	3.91—4.85 4.37	15.3—17.0 16.11	2.7—3.6 2.99	57.6—67.8 64.11	0.79—2.0 1.14	3.70—6.78 5.46	86.70—98.96 94.61	8.0—14.5 11.70	0.20—0.26 0.23	6.8—7.9 7.5
2018	4.11—4.77 4.42	15.0—16.9 15.95	2.6—3.1 2.92	62.5—68.2 65.07	0.61—1.40 0.91	3.6—7.2 6.07	91.04—100.70 95.59	11.37—16.20 13.98	0.20—0.25 0.22	7.3—8.2 7.8
2019	0.88—4.60 4.22	15.2—16.5 15.77	2.9—3.5 3.12	63.0—69.0 65.97	0.95—1.90 1.3	3.6—6.3 5.02	92.0—97.9 95.64	10.4—14.4 12.49	0.21—0.25 0.23	7.2—7.9 7.6
2020	4.01—4.48 4.30	11.3—16.0 14.29	2.95—3.40 3.1	52.8—71.0 64.55	0.45—1.17 0.90	1.9—5.3 3.84	76.5—101.4 91.25	9.1—13.5 11.2	0.17—0.25 0.21	7.5—8.0 7.7
2021	3.81—4.7 4.24	13.5—16.0 14.89	3.00—3.30 3.14	57.8—66.5 61.5	0.61—2.60 1.17	2.50—4.50 3.76	84.8—94.9 89.61	9.8—13.3 11.87	0.16—0.25 0.21	7.4—8.0 7.6
Байкал 2011—2020 гг.										
2011, 2013, 2017— 2020	3.04—4.87 4.36	11.8—16.40 15.17	2.5—3.1 3.0	53.7—70.0 64.15	0.37—1.28 0.88	2.4—8.1 5.58	75.80—119.40 93.97	— —	0.16—0.40 0.22	7.2—8.4 7.7

Примечание. В таблице использованы только данные авторов. Здесь и далее: прочерк — отсутствие данных. Над чертой — мин—макс, под чертой — среднее.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Уровень воды в Байкале. В 2014—2016 гг. уровень воды в оз. Байкал соответствовал экстремально низкой водности по сравнению с предыдущими годами исследований (с 1997 г.). По данным Росгидромета [Государственный доклад..., 2017], в эти годы за период весеннего половодья приток воды в озеро был минимальным. Летний период в бассейне водосбора характеризовался аномально высокими температурами воздуха при почти полном отсутствии атмосферных осадков. Лето было жарким и засушливым, постоянно отмечались пожары. На основном притоке озера — р. Селенга в июле-августе наблюдалось опасное гидрологическое явление — низкая межень.

С 2018 г. приток воды в Байкал увеличивается, в последующие годы (2019—2021 гг.) наблюдается подтопление речных притоков, впадающих в Байкал, а также береговой зоны Байкала и Ангары.

Температурный режим воздуха и воды в истоке Ангары. Исследование годовых температур поверхности воды в истоке Ангары показало [Шимараев, Троицкая, 2018] закономерность в их изменении с 1960 по 2016 г. с постепенным увеличением от 0.5 до 1.5 °C за последние годы. Данные этих

Таблица 2. Распределение микроэлементов в воде Байкала и истока р. Ангара (мкг/л)

Эле- мент	Байкал 2011—2020 гг.	Исток Ангары						ПДК
		2006—2013 гг.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	
Al	0.02—39.38 5.1	0.56—60.0 5.4	0.56—47.0 23.0	0.80—7.2 2.7	0.31—52.9 8.9	3.51—12.00 6.7	1.13—23.40 5.7	500
Si	178—3096 699	115—1602 303	171—682 404	130—760 462	379—604 519	156—596 315	277—584 427	10000
Fe	0.01—66.56 5.00	0.7—196 19	0.44—6.4 2.42	2.04—18.2 6.42	1.75—76.71 16.94	5.33—24.06 10.60	1.14—41.03 12.75	300
Mn	0.01—17.2 2.6	0.02—68.0 6.4	0.21—5.2 2.0	2.19—70.0 13.5	2.48—669.0 144	4.81—50.70 27.0	0.50—255.0 70.5	100 (500)
Li	1.24—2.20 1.83	0.13—2.48 1.93	1.83—2.26 2.08	1.85—2.27 2.05	1.90—2.28 2.09	1.46—2.80 2.15	1.34—2.19 1.9	30
B	3.70—8.18 5.0	3.2—13.6 6.2	4.5—6.1 5.3	4.5—5.8 4.9	4.64—5.90 5.1	4.9—8.5 5.7	3.9—5.4 4.7	500
S	1548—2353 1927	1549—3347 2052	1634—1984 1872	1885—5508 2415	1909—2825 2221	1978—3156 2153	1897—3592 2239	10000
Sc	0.002—0.01 0.003	0.0004—0.18 0.012	0.002—0.006 0.004	0.002—0.005 0.003	0.002—0.014 0.005	0.001—0.01 0.005	0.001—0.01 0.005	—
V	0.10—0.44 0.36	0.02—0.49 0.35	0.33—0.84 0.54	0.34—0.46 0.38	0.33—0.61 0.39	0.34—0.60 0.39	0.33—0.47 0.39	100
Cr	0.052—0.74 0.10	0.01—3.70 0.15	0.07—0.40 0.10	0.06—0.13 0.09	0.07—0.85 0.25	0.08—0.32 0.14	0.05—0.31 0.15	50
Co	0.009—0.12 0.02	0.009—0.30 0.02	0.009—0.015 0.01	0.009—0.014 0.01	0.002—0.073 0.02	0.001—0.07 0.03	0.004—0.09 0.03	100
Ni	0.088—2.32 0.21	0.03—4.32 0.40	0.14—0.24 0.18	0.18—1.36 0.41	0.17—1.28 0.53	0.17—0.50 0.29	0.21—0.54 0.30	100
Cu	0.14—2.37 0.52	0.09—9.93 1.08	0.33—1.43 0.58	0.39—2.67 1.01	0.38—5.05 2.00	0.63—6.96 2.20	0.36—4.99 1.50	1000
Zn	0.03—32.96 4.6	0.03—52.1 3.9	0.2—4.9 1.2	0.68—8.5 3.27	0.03—54.8 12.7	2.03—119.7 32.6	1.9—10.8 4.7	5000
As	0.21—0.56 0.40	0.09—0.98 0.41	0.34—0.63 0.46	0.38—0.48 0.41	0.34—0.56 0.41	0.25—0.73 0.42	0.34—0.51 0.42	50
Sr	82—119 104	75—133 102	96—117 108	106—117 111	82—117 108	88—182 107	89—112 104	7000
Y	0.004—0.076 0.009	0.002—0.022 0.007	0.0037—0.01 0.007	0.004—0.025 0.011	0.005—0.078 0.024	0.008—0.042 0.019	0.004—0.020 0.010	—
Mo	0.77—1.60 1.36	0.15—1.93 1.28	0.001—1.64 1.30	1.32—1.52 1.39	0.778—1.57 1.36	1.32—2.28 1.45	1.23—2.34 1.44	250
Cd	0.003—0.06 0.013	0.003—0.064 0.01	0.012—0.13 0.030	0.01—0.04 0.020	0.013—0.183 0.049	0.02—0.06 0.034	0.02—0.04 0.03	1
Sn	0.06—0.22 0.06	0.005—0.16 0.03	0.004—0.021 0.008	0.014—0.063 0.027	0.0025—0.346 0.1	0.002—0.222 0.09	0.001—0.129 0.03	—
Sb	0.023—0.14 0.047	0.02—0.69 0.04	0.027—0.032 0.030	0.029—0.088 0.039	0.028—0.081 0.047	0.032—0.087 0.041	0.03—0.06 0.04	50
Pb	0.059—1.45 0.078	0.001—0.51 0.07	0.0085—0.05 0.03	0.004—0.12 0.06	0.023—1.58 0.25	0.08—0.89 0.23	0.03—1.10 0.41	30
Th	0.0006—0.014 0.0012	0.0002—0.065 0.009	0.0004—0.005 0.002	0.0003—0.003 0.001	0.0004—0.016 0.003	0.0008—0.019 0.003	0.0002—0.010 0.002	—
U	0.32—1.96 0.55	0.09—0.96 0.54	0.45—0.61 0.54	0.52—0.61 0.56	0.49—0.64 0.55	0.51—0.96 0.59	0.46—0.61 0.54	15
Hg	<0.0005—0.022 0.0014	<0.0005—0.009 0.0012	0.0005—0.0012 0.0005	<0.0005—0.004 0.0012	<0.0005—0.005 0.0016	<0.0005—0.005 0.0016	0.0006—0.0016 0.001	0.5
Кол-во проб	108	100	24	18	12	12	14	—

Примечание. ПДК — предельно допустимая концентрация в питьевой воде [Контроль..., 1998]. Предельно-допустимая концентрация урана в питьевой воде составляет 15 мкг/л [ГН 2.1.5.2280-07., 2008].

авторов по межгодовым и годовым температурным трендам в 1960—2016 гг. подтверждаются полученным нами положительным трендом температурных изменений воды в истоке Ангары в 2006—2013 гг.

Как уже отмечено, в 2014—2016 гг. уровень воды в Байкале соответствовал экстремально низким условиям водности. По данным Росгидромета, за период весеннего половодья приток воды в озеро был минимальным [Государственный доклад..., 2017]. Отмечались повышенные температуры воздуха (20°C и более), 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.

За последние 5 лет исследований (2017—2021 гг.) самая высокая температура воздуха отмечалась летом 2018 г., до $+25^{\circ}\text{C}$, а самая холодная — в январе 2018 г., до -30°C . Вода в истоке Ангары максимально прогревалась летом и осенью 2020 г. до $+17^{\circ}\text{C}$, однако среднегодовая температура воды в истоке Ангары с 2017 г. понизилась с 8 до 4°C . Причиной такого изменения исследователи объясняют поступлением глубинной воды в южной части Байкала за счет процессов апвеллинга—даунвеллинга [Troitskaya et al., 2022]. Соответственно, в истоке Ангары среднегодовая температура за последние годы заметно уменьшилась до $4\text{--}5^{\circ}\text{C}$ (рис. 2), фиксируя отрицательный температурный тренд. Уменьшение температуры воды в истоке Ангары также может быть обусловлено подъемом более холодной глубинной или придонной воды Байкала во время частых землетрясений и геодинамических подвижек в последние годы (2017—2021 гг.).

Макрокомпонентный состав воды. Данные по макрокомпонентному составу, полученные в 1997—2021 гг., подтверждают низкую минерализацию (TDS) и бикарбонатно-кальциевый состав воды Байкала и истока Ангары (см. рис. 2; табл. 1), которые отмечались исследователями ранее [Грачев, 2002; Коваль и др., 2005; Галазий, 2012; Khodzher et al., 2017, 2018; Домышева и др., 2019; и др.]. В 2017 г. средняя минерализация воды истока составляла 94.61 (86.70—98.96), в 2018 г. — 95.59 (91.04—101.70), в 2019 г. — 95.64 (92.00—97.90) мг/л. В 2020 г. произошло заметное снижение минерализации — 91.25 (76.50—101.40) мг/л, которое отмечалось и в 2021 г. — 89.61 (84.80—94.90) мг/л. Ранее такая низкая

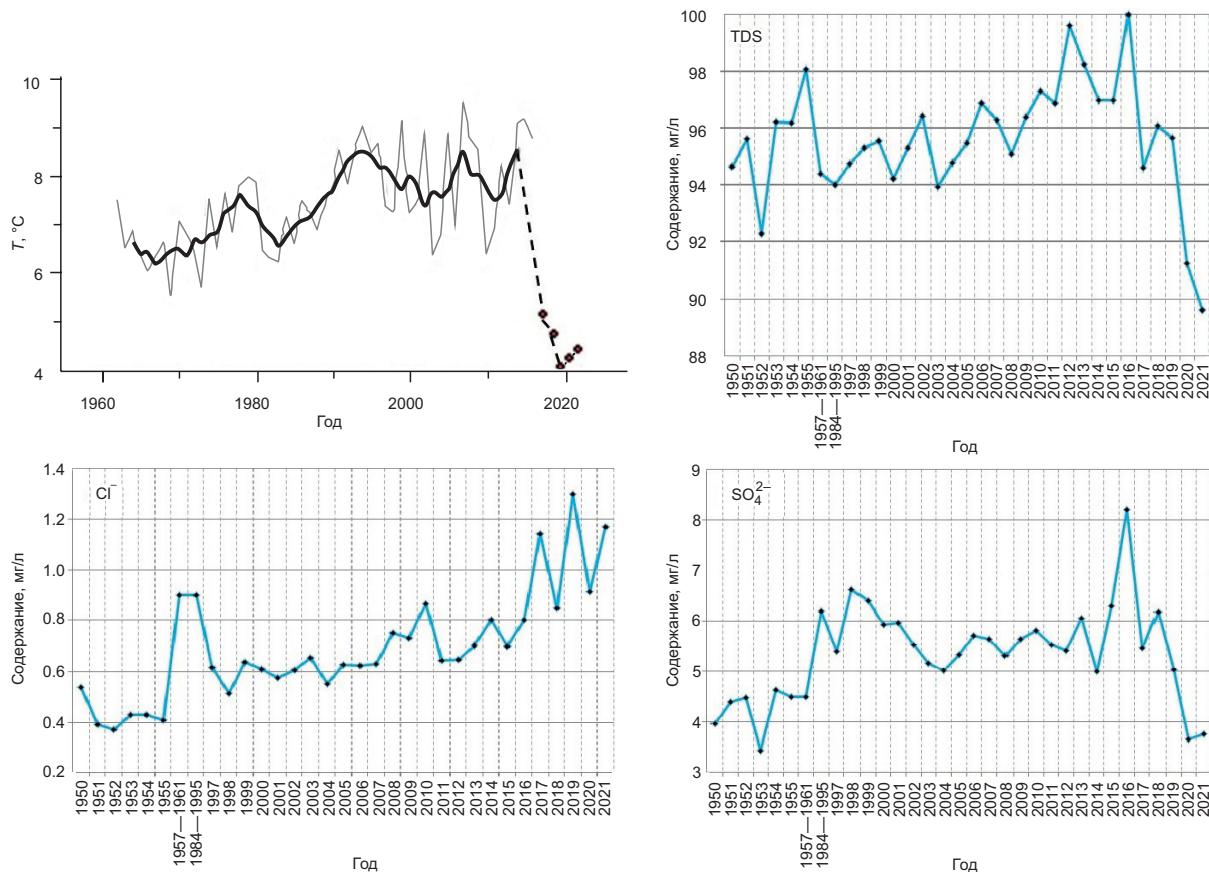


Рис. 2. Средняя годовая температура поверхности воды в 1960—2020 гг. в истоке Ангары (тонкая линия) и ее пятилетнее скользящее среднее значение (жирная линия) [Шимараев, Троицкая, 2018],

среднегодовая температура воды в 2017—2021 гг. (штриховая линия — авторские данные) и среднегодовые значения состава воды (TDS, Cl⁻, SO₄²⁻) истока р. Ангара в 1950—2021 гг. (по авторским и литературным данным [Государственный доклад..., 2017]).

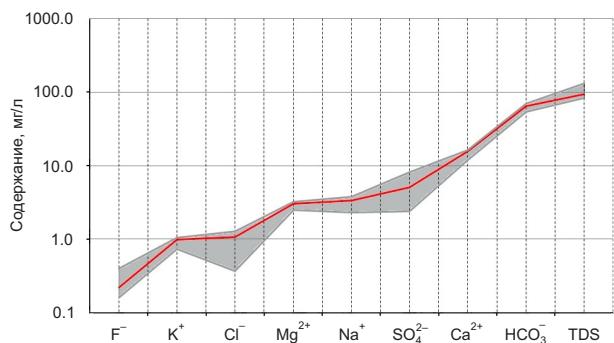


Рис. 3. Распределение ионов и минерализации в воде Байкальской экосистемы:

минимальное—максимальное содержание в поверхностной и глубинной воде Байкала в 2011—2020 гг. (серое поле) и среднее содержание компонентов в воде истока Ангары в 2017—2020 гг. (красный тренд).

отметить, что в 1952—1956 гг. проходило строительство Иркутской ГЭС на Ангаре в 65 км от ее истока (район г. Иркутск), и отмечалось одновременно такое же уменьшение TDS, сульфат- и гидрокарбонат-ионов. В последние годы снижение содержаний сульфат-иона и гидрокарбонат-иона, возможно, было обусловлено закрытием в 2013 г. Байкальского целлюлозно-бумажного комбината.

Циклически-волновое изменение TDS воды в Ангаре с постепенным незначительным нарастанием значений отмечалось с 1950 до 2016 г. (см. рис. 2; табл. 1). Полученные данные по минерализации воды истока Ангары коррелируют с температурными циклами изменения воды и с последовательным незначительным увеличением среднегодовых температур. Общая минерализация воды Ангары фиксирует длительный восходящий природный цикл изменений с 1950 до 2017 г. (см. рис. 2), а далее начинается понижение значений TDS и главных ионов — SO_4^{2-} , HCO_3^- . С 2021 г. намечается некоторое увеличение содержаний главных ионов (SO_4^{2-} , HCO_3^-) в воде истока Ангары, что, возможно, означает начало положительной динамики в обновлении воды Байкала и истока Ангары.

В 2017 г. заканчивается положительная направленность тренда распределения концентраций макромолекул в воде, начинается снижение концентраций главных ионов и общей минерализации. Эти тренды имеют циклическо-волновой характер, когда проявляются годовые сезонные изменения (рис. 3; табл. 1): минерализация уменьшается в летнее время и увеличивается в холодное время года. Если предыдущие годы (2017, 2018 гг.) в Прибайкалье были еще относительно засушливые и пожароопасные, то в 2019—2021 г. на реках Байкальской экосистемы наблюдались серьезные наводнения и подтопления, однако катастрофических изменений в химическом составе воды истока и Байкала не отмечалось.

Сезонные и годовые значения TDS обусловлены главным образом изменениями концентрации гидрокарбонат-ионов, а также катионов кальция и сульфат-ионов, которые понижаются преимущественно в теплое время года — лето—осень. Однако в 2020 г. для этих компонентов пониженные значения отмечались и в конце года (ноябрь, декабрь). Существует корреляция между концентрацией гидрокарбонат-иона и TDS (~ 0.8 — 0.9 , $R_2 = 0.9233$).

Анализ информации по изменению концентраций ионов и TDS в воде Ангары за 1950—2021 гг. (см. рис. 2; табл. 1) показал, что годовые циклы изменчивости могут длиться дольше чем 10 лет, как предполагалось нами ранее [Гребенщикова и др., 2011, 2013, 2018; Grebenshchikova et al., 2021]. В дополнение к длительным циклам могут происходить ежемесячные волновые (сезонные) изменения минерализации воды и даже дневные, обусловленные какими-либо кратковременными природными явлениями (катализмами): землетрясениями, ураганами, штормами, пожарами и др. В целом низкая минерализация (76—110 мг/л, в среднем примерно на уровне 95—96 мг/л) воды истока Ангары сохраняется уже более 70 лет — 1950—2021 гг. Заметные гидрохимические изменения, или новый геохимический цикл (тренд), наметились после 2017 г., что также может являться результатом влияния разных факторов, в том числе климатических и гидродинамических. Прогрев поверхностной воды Байкала в направлении с северной его части к южной (к истоку Ангары) снижается по различным причинам — воздействие ветра, возникновение апвеллинга/даунвеллинга, вертикальный теплообмен и др.

Концентрации азотсодержащих ионов в поверхностных водах истока всегда подвержены заметным сезонным колебаниям: они минимальны в вегетационный период с ростом фитопланктона и, как правило, 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 и с увеличением числа туристов и интенсивным сбросом сточных вод с туристических баз и гостиниц в юго-западной части Байкала (пос. Листвянка). В 2020—2021 гг. содержания азотсодержащих компонентов заметно уменьшились из-за меньших сбросов сточных вод в период пандемии и постоянных проверок природоохранными органами.

Концентрация фторид-иона в воде истока в 2017—2021 гг. изменялась от 0.16 до 0.26 мг/л, что соответствует предыдущим годам исследований. Повышение содержаний иногда обнаруживалось толь-

ко весной, когда оз. Байкал освобождалось от снега и льда и эта тающая загрязненная масса поступала в исток Ангары.

В воде Байкала и Ангары много кислорода (8—14, реже до 16 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. В 2021 г. содержание кислорода в истоке Ангары изменилось от 10 до 13 мг/л.

Анализ распределения содержаний кремния и фосфора в воде Байкала фиксирует ранее установленную исследователями [Грачев, 2002; Khodzher et al., 2017, 2018; и др.] закономерность их заметного повышения в придонной воде по сравнению с поверхностной, что объяснялось отмиранием и накоплением на дне Байкала диатомовых водорослей, губок, створок некоторых моллюсков и других органических компонентов.

Полученные среднегодовые данные по макроэлементному составу воды истока Ангары в 1950—2021 гг. находятся в поле минимальных—максимальных значений состава воды Байкала в 2011—2020 гг. (см. рис. 3; табл. 1) и близки или ниже предельно допустимых концентраций не только питьевой воды, но и воды рыбохозяйственных водоемов [Контроль..., 1998]. Это означает, что вода истока Ангары, как и вода Байкала, сохраняет свою чистоту до наших дней, что крайне важно как для человека, так и для биоты.

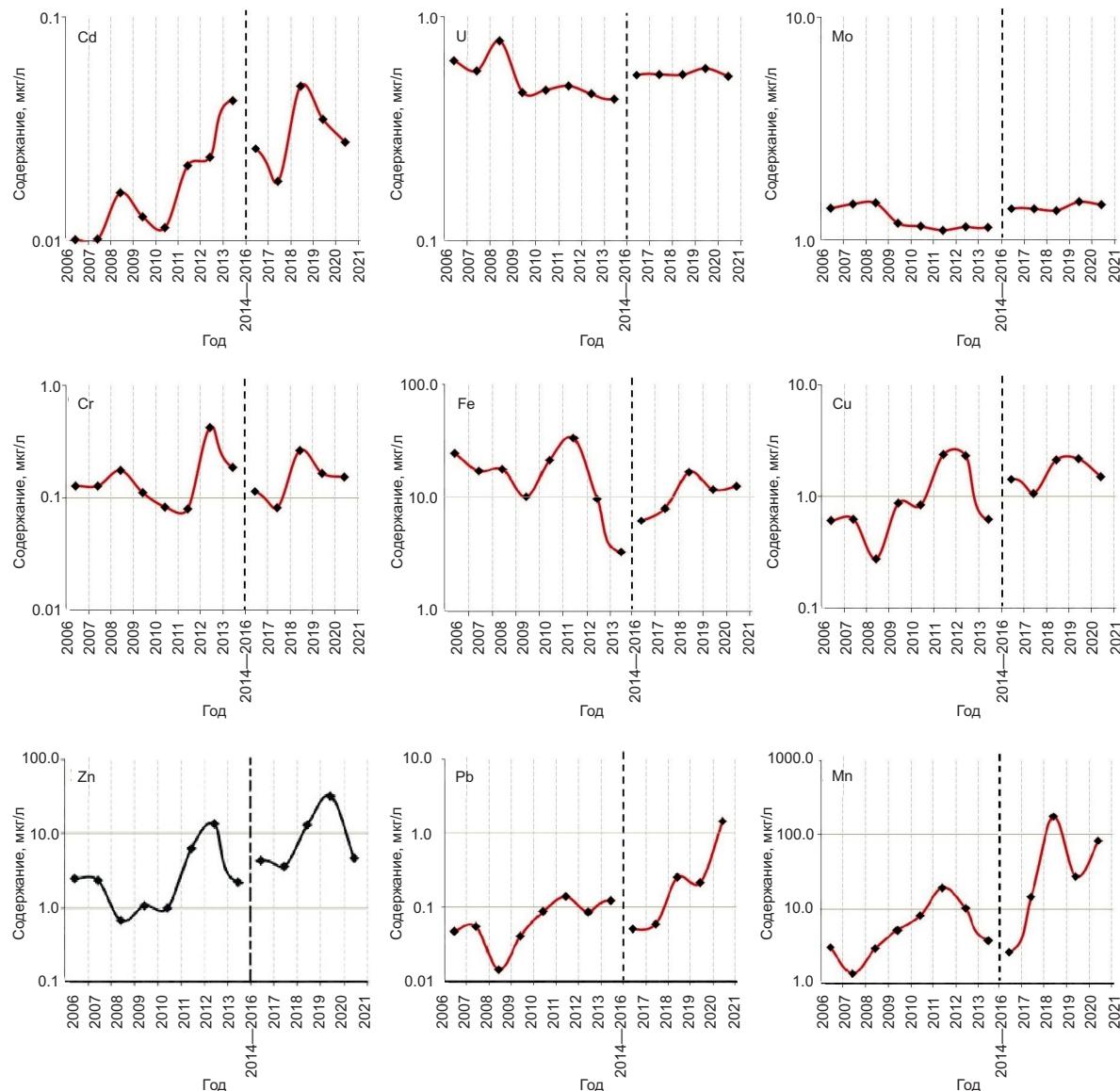


Рис. 4. Среднее годовое распределение концентраций микроэлементов (мкг/л) в воде истока Ангары в 2006—2021 гг. (вертикальный пунктир — отсутствие данных за 2014—2016 гг.).

Микроэлементный состав воды. Большинство микроэлементов в воде Байкала и Ангары в целом имеют довольно низкие концентрации, значения многих из них (например, Be, Sn, Sb, Se, Ag, Ta, Nb, 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. Однако разовые аномальные концентрации многих микроэлементов объяснить затруднительно.

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 таких элементов и растворение их в воде лишь кратковременно обогащает воду литоральными частями Байкала, затем выравнивание их содержаний происходит по всему Байкалу за счет системы течений. Средние содержания этих элементов в воде Байкала и истока Ангары очень близки за весь период исследований (1950—2021 гг.) (см. табл. 2).

К микроэлементам, содержания которых могут часто повышаться в воде Байкала и истока Ангары более чем в 10 раз (см. табл. 2; рис. 4), относятся Fe, Mn, Hg, Al, Zn, Pb, Cu, Cr, что ранее уже нами отмечалось [Grebenshchikova et al., 2021]. Различия в концентрациях остальных элементов менее контрастны [Склярова и др., 2011]. Рассмотрим возможные причины волатильности концентраций некоторых элементов.

Резкие повышения содержаний Fe и Mn в воде истока Ангары и Байкала (см. рис. 4) можно объяснить наличием в донных осадках Байкала большого количества мелководных и глубоководных железомарганцевых конкреций, содержащих кроме железа и марганца элементы-спутники — Zn, Ni, Cr, Co, Cu. Эти элементы могут частично растворяться из конкреций в восстановленных осадках вблизи редокс-границы [Гранина, 2008] и обогащать не только поровые воды, но и придонную воду Байкала, а затем соответственно и 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 бывают существенно повышенены. Также здесь повышены суммы редкоземельных элементов, концентрации фтора и тория. Река Рель дrenирует массив палеопротерозойских гранитов [Байкаловедение, 2012; Sklyarov et al., 2015], которые могут быть источником поступления перечисленных элементов в воду Байкала при их разрушении и выщелачивании. Аналогичное повышение концентраций отмеченных элементов наблюдается также в центральной части западного побережья Байкала — в устьях притоков рек Анга, Сарма и др., которые также дrenируют аналогичные по составу гранитные породы.

Другим примером влияния вмещающих коренных пород на воду Байкала и истока Ангары являются относительно повышенные концентрации в воде урана в некоторых притоках Байкала. Так, повышенные содержания урана обнаружены на западном побережье Байкала в устьях притоков Анга и Бугульдейка. Здесь, а также в притоках в районе г. Слюдянка, побережья Тажеранской степи и на о. Ольхон, в породах было обнаружено и подтверждено нахождение урансодержащего минерала — менделеевита, позднее диагностированного [Рихванов и др., 2018] как оксиуранобетафит надгруппы пирохлора. Повышенные содержания урана в подземных водах Ольхона могут быть обусловлены наличием урансодержащего ортита в пегматоидных жилах, характерных для субщелочных габброидов и щелочных сиенитов Ольхона [Макрыгина и др., 2016]. Возможны и другие причины небольших вариаций концентраций урана, например, влияние органических компонентов в донных осадках Байкала и поглощение ими растворенного урана из водной толщи. Известно также, что повышенное содержание урана может коррелироваться с повышением концентраций железа в воде. Полученные концентрации урана (см. табл. 2) в воде Байкальской экосистемы (вода Байкала, притоков и истока Ангары) значительно ниже предельно допустимых концентраций урана в питьевой воде [ГН 2.1.5.2280-07, 2008] — 15 мкг/л.

Концентрации S, Mo, Li, U, Cd, Se в воде Байкала и истока Ангары низкие, различаются незначительно — максимум в 2—3 раза в пределах одного порядка значений (см. рис. 4; табл. 2).

Стоит учитывать воздействие на воду Байкала и истока Ангары имеющихся вокруг холодных и горячих источников с повышенными содержаниями некоторых ионов и микроэлементов, влияние которых рассматривается как природное загрязнение воды Байкала [Sklyarov et al., 2015]. Такие источники имеют значительно более высокие концентрации SO_4^{2-} , Cl^- , F^- , Na и Si , чем в озерной воде Байкала, а также в десятки раз больше обогащены Li, Rb, Cs, Ga, As, W. Повышенные концентрации Co, Ni, Zn и Cd предполагают наличие в районах их нахождения на глубине сульфидной минерализации и ее дренаж термальными водами. Несмотря на то, что источники имеют гораздо большее обогащение по сравнению с байкальской водой по ряду элементов, их влияние на воду Байкала также отмечается только в воде в литоральных зонах и является незначительным (локальным) в связи с различным типом течений в Байкале и быстрым перемешиванием воды.

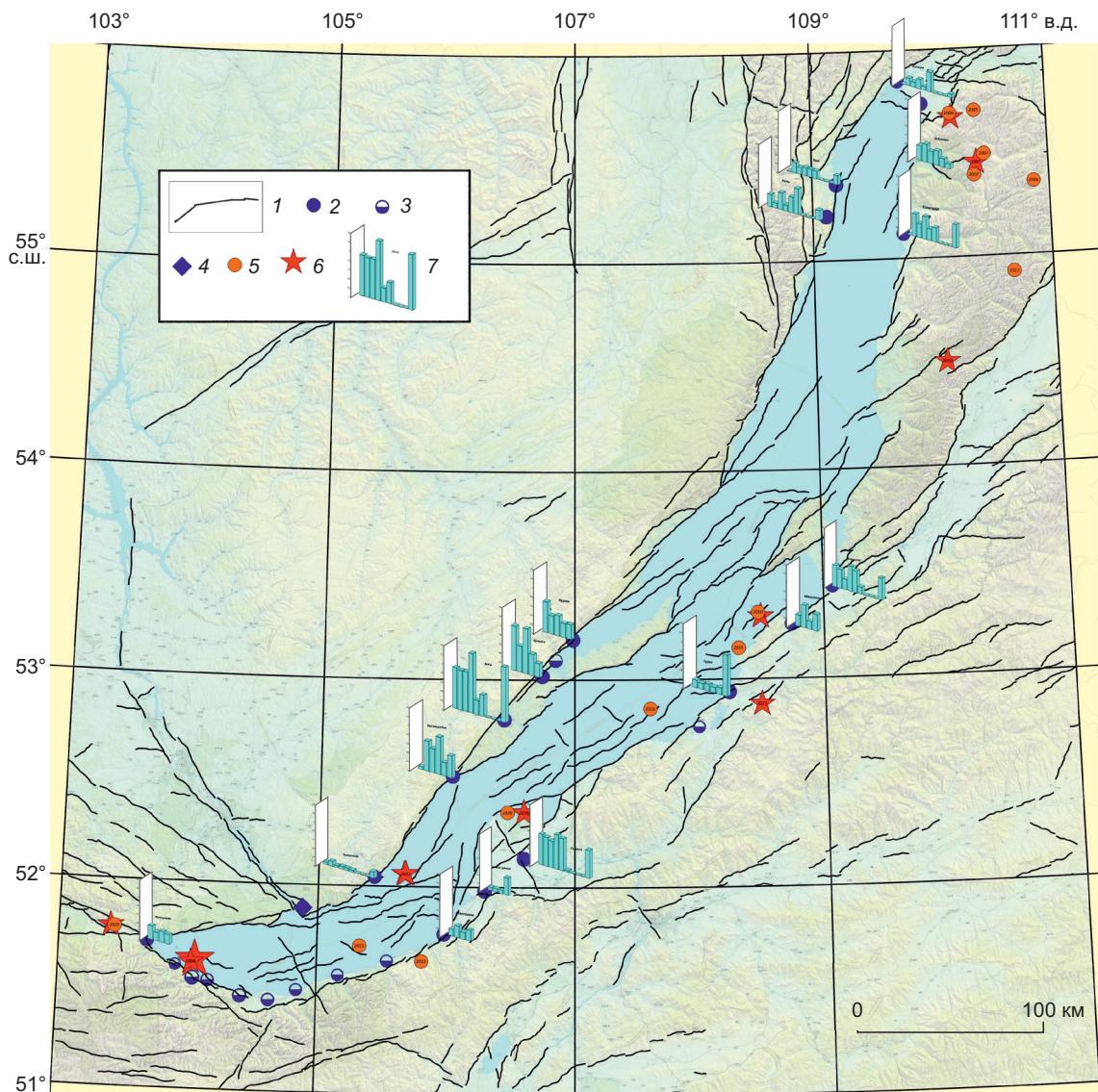


Рис. 5. Карта эпицентров землетрясений и графиков временного распределения значений концентрации U в устьях речных притоков.

1 — разломы [Zelenin et al., 2022]; 2 — пункты сбора проб в притоках; 3 — пункты сбора проб, где показатели ниже среднего значения по устьям притоков; 4 — исток р. Ангара; землетрясения: 5 — с $m_b \geq 4$; 6 — с $m_b \geq 5$ [<http://www.isc.ac.uk>]; 7 — графики распределения значений концентрации U в устьях речных притоков. Белые столбики — шкала по минимальному—максимальному содержанию U в воде притоков.

Ранее П.В. Коваль [Коваль и др., 2003] отмечал кратковременное экстремальное повышение концентраций Hg в воде Ангары во время землетрясений, превышающее предельно допустимую концентрацию в рыбохозяйственных водоемах, которое назвали «рутутным дыханием Байкала». Такое явление относится к разряду природных катаклизмов и было подтверждено позднее нашими исследованиями [Гребенщикова и др., 2020; Grebenchikova, Kuzmin, 2022]. При этом было установлено повышение концентраций ртути в 4—5 раз по сравнению с фоновыми содержаниями в воде устьев притоков, где также фиксировались при землетрясении геодинамические подвижки, например, в устье притока Усть-Баргузин (восточный берег Байкала).

Результаты определения содержания урана в воде истока Ангары были сопоставлены с сейсмическим процессом района оз. Байкал, являющегося частью Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) (рис. 5). В работах [Гребенщикова и др., 2020; Ключевский и др., 2021] было показано, что всем значимым максимумам Hg предшествуют сильные геодинамические воздействия. Аналогичная ситуация наблюдается в распределении концентрации урана в воде истока Ангары и притоков (рис. 6).

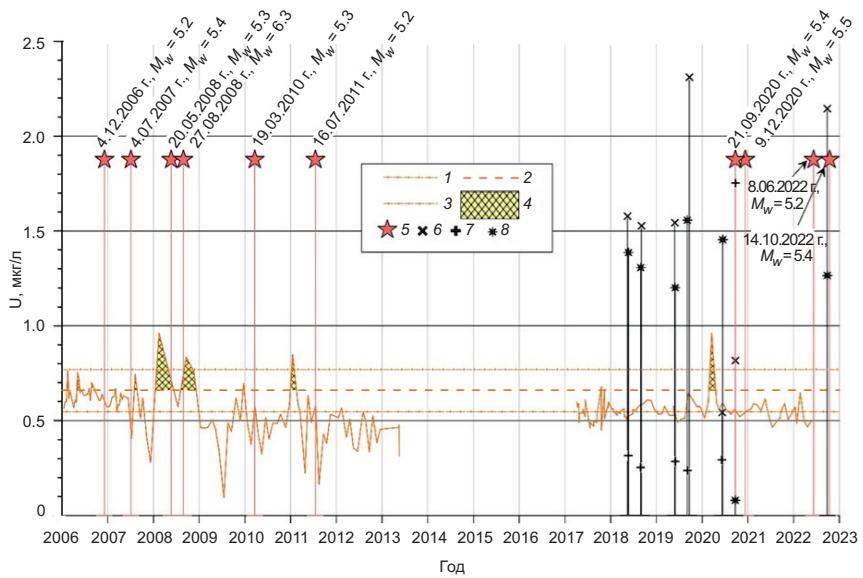


Рис. 6. График распределения значений концентрации U в воде истока Ангара в 2006—2022 гг.

1 — среднее значение; 2 — σ ; 3 — 2σ ; 4 — область значений графика, превышающих σ ; 5 — землетрясения с $m_b \geq 5$; значения концентрации в устьях притоков: 6 — р. Анга, 7 — р. Турка, 8 — р. Селенга.

Известно [Летников и др., 1996], 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 [Артюшков и др., 1990]. Флюидизация верхних частей мантии способствует их плавлению с приращением объема, чему содействует также снижение всестороннего давления при раскрытии локальных участков зоны краевого шва. Это, в свою очередь, приводит к инверсиям осей напряжений в литосфере БРЗ, реализации сильных землетрясений и возможному поступлению урана на поверхность по зонам раскрытых разломов. В работе [Rasskazov et al., 2020] было показано, что параметр концентрации U увеличивался, когда активные разломы подвергались растяжению, и уменьшались, когда они испытывали сжатие. Анализ графика вариаций во времени содержания урана в воде устьев притоков (см. рис. 6) показал, что самые значительные максимумы наблюдаются за некоторое время (от нескольких суток до нескольких месяцев) до сильного землетрясения ($m_b \geq 5$). Максимальные значения, превышающие 2σ , были зафиксированы перед землетрясениями 27.08.2008 г. ($M_s = 6.2$), 16.07.2011 г. ($m_b = 5.3$) и группой землетрясений 21.09.2020 г. ($m_b = 5.3$), 9.12.2020 г. ($m_b = 5.1$), а также после сильнейшего Култуцкого землетрясения 27.08.2008 г. ($M_s = 6.2$). Еще большие значения были зафиксированы в устьях притоков перед землетрясениями 2020 г. (см. рис. 6): р. Анга (2.58 мкг/л) за год до первого события, р. Селенга (1.55 мкг/л) за год и за три месяца, р. Турка (1.75 мкг/л) сразу после землетрясения. За 20 дней перед землетрясением 14.10.2022 г. ($m_b = 5.4$) на притоках были зафиксированы следующие высокие значения мкг/л: р. Анга (2.40), р. Турка (1.75), р. Селенга (1.26). Учитывая расположение точек отбора проб воды устьев рассматриваемых рек, можно сказать, что увеличение содержания урана в воде притоков охватывает одновременно большую область Байкальской экосистемы.

Можно отметить, что из 20 определенных механизмов землетрясений с $m_b \geq 4.3$ [<http://www.isc.ac.uk>] за исследуемый период 18 были с преобладающей сбросовой подвижкой, что может подчеркнуть режим растяжения, который, согласно работе [Rasskazov et al., 2022], характеризуется увеличением концентрации изотопов урана в подземных водах.

Полученные данные по особенностям концентраций урана в устьях некоторых притоков Байкала свидетельствуют, что вариации содержаний урана в воде связаны с результатом сейсмотектонических процессов или с сильным геодинамическим воздействием в регионе.

Вероятны и антропогенные или природно-антропогенные причины изменения концентраций микроэлементов. В частности, это использование населением угля Иркутского угольного бассейна, содержащего повышенные концентрации Pb, Zn, Cu, U, Hg и других токсичных элементов. После сгорания угля эти элементы выпадают на снеговой покров озера, а при таянии снега поступают в воду Байкала

Рис. 7. Распределение элементов в воде Байкала в 2011—2020 гг. (серое поле — минимальное—максимальное содержание) и среднее содержание в воде истока Ангары в 2017—2021 гг. (синяя линия).

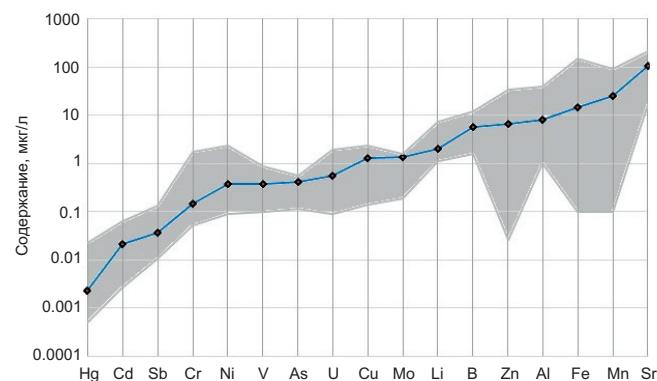
и истока Ангары. Другой причиной может быть автотранспорт и нарастающий туристический поток. Предполагается также влияние ближайших промышленных предприятий (алюминиевый завод в 50 км — г. Шелехов, многочисленные предприятия в г. Улан-Удэ и на берегах р. Селенга) за счет атмосферного переноса токсикантов. Действительно, содержания F и особенно Al в воде Байкала и истоке Ангары в весенний период подвержены существенным изменениям (см. табл. 2).

Средние содержания Ni, Zn, а также Fe, Y, Cd, Co в воде истока бывают иногда существенно выше, чем в воде Байкала. Возможно, что на воду Ангары оказывает негативное влияние ближайший к истоку туристический пос. Листвянка [Сутурин и др., 2016]. Поскольку объем прибрежных вод Байкала, ограниченных 50-метровой изобатой, составляет около 6 % от его водной массы (23 тыс. км³), то концентрация элементов в прибрежных водах в течение какого-то времени может быть существенно выше их концентраций в воде пелагиальной части Байкала.

Таким образом, обобщение данных по микроэлементам в воде Байкала и, соответственно, в истоке Ангары в 2006—2021 гг. показало заметное повышение концентраций некоторых элементов-токсикантов в последние годы (см. рис. 4, 7).

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 различающихся межгодовых циклов, внутри которых отмечаются менее протяженные волны концентраций (минимум—максимум—минимум), т. е. существуют временные ряды волновой динамики в показателях химического состава воды — много повторений. По макрокомпонентам в воде истока довольно отчетливо проявляется фрактальность (самоподобие) в период исследований, или, как отмечают другие исследователи [Домышева и др., 2019], содержания макрокомпонентов в воде Байкала и истока Ангары остаются стабильными как в сезонном, так и межгодовом аспекте в 2010—2018 гг., изменения их содержаний находятся в пределах точности методов анализа. При этом сохраняются средние значения ионов, с одной стороны, и отмечается постепенное уменьшение или увеличение содержаний элементов в динамике со временем. Другие исследователи [Розенталь, Тамбирова, 2020; Данилов-Данильян, Розенталь, 2022] называют такое явление эффектом памяти, наблюдаемым во временных рядах, что представляется следствием упорядоченной регулярности, которая частично проявляется в наличии водно-экологической фрактальности (самоподобные циклы), что фиксируется в воде истока Ангары при многолетнем геохимическом мониторинге (1950—2021 гг.).

Большую роль в изменении состава воды имеет гидродинамическая структура водного потока, что определяется различными препятствиями на его пути (например, каким-либо природным фактором — геохимический барьер или природно-техногенный барьер). Таким препятствием для истока Ангары является уступ в южной береговой части Байкала глубиной до 400 м, откуда вода поступает в исток Ангары. На химический состав воды Байкала и, соответственно, истока Ангары влияют многочисленные притоки, имеющие различный химический состав и различные по размерам дельты (или природные геохимические барьеры), где может происходить осаждение многих привносимых веществ, что ранее отмечал И.С. Ломоносов [Атлас..., 2005].



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что происходящие изменения концентраций элементов в воде Байкальской экосистемы могут быть обусловлены сезонными климатическими изменениями (температурой воздуха и воды, пожарами, ураганами и штормовыми ветрами), гидродинамическими условиями в Байкале и Ангаре (уровень воды, засухи, наводнения), составом вмещающих Байкал пород и рудопроявлений, частыми землетрясениями в Байкальской рифтовой зоне, существующими специфическими течениями поверхности воды, подъемом глубинной воды и опусканием поверхности воды, а также наличием в придонных частях Байкала грязевых вулканов, сипов (поступление метана), разрушением придонных железомарганцевых конкреций и другими причинами.

Установлен циклическо-волновой характер изменения химического состава р. Ангара — стока оз. Байкал, и меняющийся во времени главный тренд (температурный, химический) указывает на наличие эффекта долговременной памяти в химических временных рядах элементов. Эффект заключается в том, что текущие значения контролируемых химических 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 восстанавливаться, достигая прежних (средних) значений химических параметров и образуя слабоположительные или слабоотрицательные тренды (циклы), проявляющиеся во временной динамике.

В 2017 г. отчетливо отмечается завершение положительной динамики (положительный тренд) циклическо-волнового распределения концентраций макрокомпонентов в воде, начинается снижение температуры воды, а также в сравнении с предыдущими годами отмечается незначительное уменьшение концентраций главных ионов и общей минерализации. Такая отрицательная тенденция сохранялась до 2020—2021 гг. По полученной и имеющейся информации в 2022—2023 гг. вновь намечается положительный тренд.

Сравнительный анализ ионного и микроэлементного состава водной экосистемы Байкала, в которую входят поверхностная, глубинная вода Байкала, вода многочисленных притоков со своей специфической составов, а также возможное поступление глубинной воды во время геодинамических подвижек, указывает на отчетливую сопряженность всех компонентов Байкальской экосистемы и отражение в химическом составе единственного стока — р. Ангара.

Анализ вариаций содержаний урана в воде притоков Байкала показывает связь с результатами сейсмотектонических процессов или сильными геодинамическими воздействиями в регионе.

Полученные за последние годы значения по среднему химическому составу воды Байкала и истока Ангары подчеркивают стабильность составов и не превышают предельно допустимых концентраций для питьевых вод и воды рыбохозяйственных водоемов. Следует продолжать многолетний геохимический мониторинг воды Байкальской экосистемы и изучение уникального процесса самоочищения воды в Байкале, чтобы понять происходящие в нем изменения в настоящем времени и прогнозировать на будущее.

Для сохранения чистоты Байкала необходимо существенно усовершенствовать комплексное туристическо-рекреационное и социально-экономическое развитие вокруг Байкальской водной экосистемы.

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

ЛИТЕРАТУРА

Атлас. Озеро Байкал: Прошлое. Настоящее. Будущее. Иркутск, ФГУП «Восточно-Сибирское аэрогеодезическое предприятие», 2005, 117 с.

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.

Байкаловедение: в 2 кн. Новосибирск, Наука, 2012, кн. 1, 468 с.

Блинов В.В., Гранин Н.Г., Мизандронцев И.Б., Гнатовский Р.Ю., Жданов А.А. Сезонные изменения вертикальной структуры водной толщи пелагиали Южного Байкала // Водные ресурсы, 2017, вып. № 3, т. 44, с. 285—295.

Гагаринова О.В. Устойчивость природных вод бассейна озера Байкал к антропогенным воздействиям // География и природные ресурсы, 2015, № 1, с. 46—54.

Галазий Г.И. Байкал в вопросах и ответах. Иркутск, ООО «Форвард», 2012, 320 с.

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.

Государственный доклад. О состоянии озера Байкал и мерах по его охране в 2016 году. Иркутск, ИНЦХТ, 2017, 374 с.

Гринина Л.З. Ранний диагенез донных осадков озера Байкал. Новосибирск, Академ. изд-во «Гео», 2008, 160 с.

Грачев М.А. О современном состоянии экологической системы озера Байкал. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2002, 156 с.

Гребенщикова В.И., Загорулько Н.А. Многолетние мониторинговые исследования макро- и микрокомпонентного состава истока реки Ангара // Вестник ИрГСХА. 2013, ч. II, вып. 57, с. 88—95.

Гребенщикова В.И., Носков Д.А., Герасимов Н.С. Геохимия и условия формирования Ангаро-Витимского гранитоидного батолита, Прибайкалье // Вестник ИрГТУ, 2009, № 3, с. 24—30.

Гребенщикова В.И., Загорулько Н.А., Пастухов М.В. Мониторинговые исследования ионного состава воды истока р. Ангары (озеро Байкал) // Вода: химия и экология, 2011, № 4, с. 2—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.

Гребенщикова В.И., Кузьмин М.И., Ключевский А.В., Демьянович В.М., Ключевская А.А. Повышенные содержания ртути в воде истока реки Ангара: отклики на геодинамические воздействия и сильные землетрясения // ДАН, 2020, т. 491, № 12, с. 77—81.

Данилов-Данильян В.И., Розенталь О.М. Методология достоверной оценки качества воды. III. Оценка качества пресной воды в условиях непостоянства контролируемых показателей // Экология и промышленность России, 2022, т. 26, № 5, с. 44—49.

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.

Домышева В.М., Сороковикова Л.М., Синюкович В.Н., Онищук Н.А., Сакирко М.В., Томберг И.В., Жученко Н.А., Голобокова Л.П., Ходжер Т.В. Ионный состав воды озера Байкал, его притоков и истока реки Ангара в современный период // Метеорология и гидрология, 2019, № 10, с. 77—86.

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 (Байкальская рифтовая зона) // Геология и геофизика, 2021, т. 62 (2), с. 293—311.

Коваль П.В., Удодов Ю.Н., Андрулайтис Л.Д., Саньков В.А., Гапон А.Е. Ртуть в воде истока р. Ангары: пятилетний тренд концентраций и возможные причины его вариаций // ДАН, 2003, т. 389, № 2, с. 235—238.

Коваль П.В., Удодов Ю.Н., Андрулайтис Л.Д., Гапон А.Е., Склярова О.А., Чернигова С.Е. Гидрохимические характеристики поверхностного стока озера Байкал (1997—2003) // ДАН, 2005, т. 401, № 5, с. 663—667.

Контроль химических и биологических параметров окружающей среды / Ред. Л.К. Исаев. СПб, Эколого-аналитический информационный центр «Союз», 1998, 896 с.

Летников Ф.А., Дорогокупец П.И., Савельева В.Б., Вилор Н.В., Лашкевич В.В., Медведев В.Я., Иванова Л.И., Балышев 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 геоэнергетика континентальной литосферы // Литосфера Центральной Азии. Новосибирск, Наука, 1996, с. 30—42.

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.

ПНД Ф 14.1:2:4.111-97 «Методика измерений массовой концентрации хлорид-ионов в питьевых, поверхностных и сточных водах меркуриметрическим методом». М., 2011, 18 с.

ПНД Ф 14.1:2:3.101-97 «Методика измерений массовой концентрации растворенного кислорода в пробах природных и сточных вод йодометрическим методом». М., 2017, 20 с.

ПНД Ф 14.1:2:3:4.282-18 «Методика измерений массовой концентрации хлорид-ионов, нитрит-ионов, сульфат-ионов, нитрат-ионов, фторид-ионов и фосфат-ионов в пробах природных, питьевых и сточных вод с применением системы капиллярного электрофореза «Капель». М., 2018, 17 с.

ПНД Ф 14.1:2:3:4.111-97 «Методика измерений массовой концентрации хлорид-ионов в питьевых, природных (поверхностных и подземных) и сточных водах меркуриметрическим методом». М., 2020.

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) // Зап. РМО, 2018, т. 147, № 6, с. 75—89.

Розенталь О.М., Тамбиева Дж.А. Волновая динамика качества речной воды // ДАН, 2020, т. 491, № 1, с. 82—86.

Семенов М.Ю., Снытко В.А., Семенов Ю.М., Силаев А.В., Семенова Л.Н. Состав металлов поверхностных вод Южного Прибайкалья и его связь с ландшафтно-геологическими условиями // ДАН, 2019, т. 486, № 5, с. 613—619.

Склярова О.А. Распределение микроэлементов в растворенном веществе водной толщи Среднего Байкала // География и природные ресурсы, 2011, № 1, с. 53—59.

Сутурин А.Н., Чебыкин Е.П., Мальник В.В., Ханаев И.В., Минаев А.В., Минаев В.М. Роль антропогенных факторов в развитии экологического стресса в литорали озера Байкал (акватория пос. Листвянка) // География и природные ресурсы, 2016, № 6, с. 43—54.

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.

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.

Шпейзер Г.М., Дедова Л.И., Дюберг В.М., Евсютин А.Г., Жучева Т.В., Куимова Л.П., Лобкова Л.И., Ломоносов И.С., Макаров А.А., Малевский А.Л., Прохоров Л.Б., Писарский Б.И. Водно-экологический мониторинг и качество вод реки Ангары // Материалы 1-го научно-методического семинара «Состояние р. Ангары и пути управления использованием ресурсов и их качеством». Второе издание. М., Московский общественный научный фонд, 2000, с. 49—64.

Ciesielski T., Pastukhov M.V., Szefer P., Jenssen B.M. Bioaccumulation of mercury in the pelagic food chain of the Lake Baikal // Chemosphere, 2010, v. 78 (11), p. 1378—1384.

Falkner K.K., Measures C.I., Herbelin S.E. The major and minor element geochemistry of Lake Baikal // Limnol. Oceanogr., 1991, v. 36 (3), p. 413—423.

Falkner K.K., Church M., Measures C.I., LeBaron G., Thouron D., Jeandel C., Stordal M.C., Gill G.A., Mortlock R., Froelich P., Chan L.H. Minor and trace element chemistry of Lake Baikal, its tributaries, and surrounding hot springs // Limnol. Oceanogr., 1997, v. 42, p. 329—345.

Grebenshchikova V.I., Kuzmin M.I. Mercury in the Baikal aquatic ecosystem (Lake Baikal, its tributaries, Angara River source) // Limnol. Freshw. Biol., 2022 (3), p. 1302—1304, doi: 10.31951/2658-3518-2022-A-3-1302.

Grebenshchikova V.I., Kuzmin M.I., Suslova M.Yu. Long-term cyclicity of trace element in the Baikal aquatic ecosystem (Russia) // Environ. Monit. Assess., 2021, v. 193 (5), Article 260.

Hachikubo A., Khlystov O., Krylov A., Sakagami H., Minami H., Nunokawa Y., Yamashita S., Takahashi N., Shoji H., Nishio Sh., Kida M., Ebinuma T., Kalmykhov G., Poort J. Molecular and isotopic characteristics of gas hydrate-bound hydrocarbons in southern and central Lake Baikal // Geo-Mar. Lett., 2010, v. 30 (3—4), p. 321—329.

<http://www.isc.ac.uk>

Khodzher T.V., Domysheva V.M., Sorokovikova L.M., Sakirko M.V., Tomberg I.V. Current chemical composition of Lake Baikal water // Inland Waters, 2017, v. 7 (3), p. 250—258.

Khodzher T.V., Domysheva V.M., Sorokovikova L.M., Tomberg I.V., Sakirko M.V. Hydrochemical studies in Lake Baikal: history and nowadays // Limnol. Freshw. Biol., 2018, № 1, p. 2—9.

Lackner M., Ouattara I., Gharaei N.A., Abolhassani R. Clean drinking water global scarcity: A review // J. Water Sci. Eng., 2020, v. 1 (5), p. 1—19.

Perrot V., Epov V.N., Pastukhov M.V., Grebenshchikova V.I., Zouiten C., Sonke J.E., Husted S., Donard O.F.X., Amouroux D. Tracing sources and bioaccumulation of mercury in fish of Lake Baikal—Angara River using Hg isotopic composition // Environ. Sci. Technol., 2010, v. 44 (21), p. 8030—8037.

Rasskazov S., Ilyasova A., Bornyakov S., Chuvashova I., Chebykin E. Responses of a $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ activity ratio in groundwater to earthquakes in the South Baikal Basin, Siberia // Front. Earth Sci., 2020, doi.org/10.1007/s11707-020-0821-5.

Rasskazov S.V., Ilyasova A.M., Snopkov S.V., Chuvashova I.S., Chebykin E.P. Mercury hazard of earthquakes in the Baikal seismic zone // Limnol. Freshw. Biol., 2022, № 3, p. 1332—1334, doi: 10.31951/2658-3518-2022-A-3-1332.

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.

Sklyarova O.A., Sklyarov E.V., Och L., Pastukhov M.V., Zagorulko N.A. Rare earth elements in tributaries of Lake Baikal (Siberia, Russia) // Appl. Geochem., 2017, v. 82, p. 164—176, doi: 10.1016/j.apgeochem.2017.04.018.

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), Article 0585, doi: 10.5800/GT-2022-13-2-0585.

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 (3), 348, <https://doi.org/10.3390/w14030348>.

Zelenin E.A., Bachmanov D.M., Garipova S.T., Trifonov V.G., Kozhurin A.I. The Active Faults of Eurasia Database (AFEAD): the ontology and design behind the continental-scale dataset // Earth Syst. Sci. Data, 2022, v. 14, p. 4489—4503.