

УДК 556.114.6(282.256.341/.5)

Современное состояние вод р. Селенги на территории России по главным компонентам и следовым элементам

Е. П. ЧЕБЬКИН^{1,2}, Л. М. СОРОКОВИКОВА¹, И. В. ТОМБЕРГ¹, Е. Н. ВОДНЕВА¹, С. В. РАССКАЗОВ², Т. В. ХОДЖЕР¹, М. А. ГРАЧЕВ¹¹Лимнологический институт Сибирского отделения РАН,
ул. Улан-Баторская, 3, а/я 278, Иркутск 664033 (Россия)

E-mail: cheb@lin.irk.ru

²Институт земной коры Сибирского отделения РАН,
ул. Лермонтова, 128, Иркутск 664033 (Россия)

(Поступила 06.09.12)

Аннотация

Исследована сезонная динамика главных ионов (Na^+ , Mg^{2+} , K^+ , Ca^{2+} , SO_4^{2-} , Cl^- , HCO_3^-), Si, 52 следовых элементов, органического углерода, рН, O_2 в главном притоке Байкала р. Селенге и впадающих в нее рек на территории России, протоках и озерах дельты, в барьерной зоне оз. Байкал (до 7 км от устья р. Селенги).

Факторным анализом выявлены четыре основные группы, различающиеся по характеру пространственно-временного распределения компонентов в р. Селенге.

Первая группа включает минерализацию воды, главные ионы и некоторые консервативные следовые элементы (В, Вг, Sr, Мо, Ва, Re, U). Концентрации этих компонентов максимальны в подледный период (март) и минимальны в период половодья (май), повышены на границе с Монголией и уменьшаются к устью по мере разбавления менее минерализованными водами притоков р. Селенги.

Элементы второй группы связаны с содержанием растворенного органического вещества, способного мобилизовать трудно растворимые и практически нерастворимые элементы (Be, Al, Ti, Fe, Ni, Cu, Ga, Y, Zr, Nb, Hf, РЗЭ, Pb, Th) в тонкодисперсные органоминеральные комплексы. Концентрации этих элементов повышены весной, в период таяния снега и активного выноса органического вещества из водосборного бассейна.

Третья группа элементов (Si, Li, Cr, Mn, Co, Zn, Ge, Rb, Ag, Cd, Sn, Cs, Bi) отражает процессы подкисления вод на фоне сезонной динамики растворенного кислорода. Концентрации этих элементов возрастают по направлению к устью (за исключением Co в период весна – осень и Ge зимой) и значительно повышены зимой.

Четвертая группа элементов (V, As, Sb, I, W, Cu) маркирует слабый трансграничный перенос в летний период. Повышенные концентрации элементов наблюдаются в июле, особенно на верхнем участке реки (0–120 км от границы с Монголией).

Максимальные и средневзвешенные концентрации большинства следовых элементов в р. Селенге ниже аналогичных показателей глобального природного речного фона. Превышение максимальных фоновых концентраций отмечено для Мо (10 %), Mn (10 %) и Ge (60 %). Средневзвешенные фоновые концентрации превышены в 2–5 раз по Zr (2.1), Nb (2.1), Sr (2.5), Ti (2.9), U (3.5), Y (3.5), Zn (3.7), Mo (3.8) и Sn (4.9), что связано с геологическим строением бассейна и естественными процессами мобилизации элементов.

Концентрации Мо, Mn, Cu, Al, Fe, V в основном створе р. Селенги и ее притоках в отдельные сезоны незначительно превышают российские нормативы, установленные для водоемов рыбохозяйственного назначения (в 80 % случаев не более 2 ПДК). В барьерной зоне оз. Байкал зафиксировано превышение рыбохозяйственных нормативов по Мо постоянно (1.2–2.1 ПДК), по Cu зимой (до 1.8 ПДК), летом (до 1.9 ПДК), осенью (до 1.3 ПДК), по V летом (до 1.6 ПДК), по Mn зимой (до 2.2 ПДК).

Ключевые слова: р. Селенга, главные ионы, следовые элементы, ICP-MS-анализ

1. ВВЕДЕНИЕ

Экологические изменения водных объектов сопряжены с нарушением их водного, химического и термического режимов, а так-

же условий поступления и осаждения взвешенного вещества. Воздействующие на эти процессы факторы могут иметь как естественное, так и антропогенное происхождение. При сочетании неблагоприятных природных фак-

торов и роста техногенной нагрузки опасность нарушения нормального функционирования водных экосистем резко возрастает. С конца XX столетия появляются сведения [1] о снижении качества вод главного притока Байкала р. Селенги на территории Монголии, что, по мнению авторов [1], вызвано ростом антропогенной нагрузки на ее водосборную территорию. В последние два десятилетия в приграничных районах Монголии интенсивно развивается сельское хозяйство, растет количество животноводческих хозяйств, численность населения, реализуется обширная программа орошаемого земледелия. Здесь активно функционируют предприятия по обработке кожи и шерсти [2]. Добыча золота в Монголии за последние 10 лет увеличилась в 17 раз. На ряде месторождений, где золото добывается гидравлическим способом, используются цианиды и ртуть, что при отсутствии рекультивации отработанных площадей может привести к повышению их содержания в речных водах и гидробионтах [3, 4].

В перспективе правительством Монголии предусматривается ряд крупных проектов, в том числе разработка хубсугульских фосфоритов, строительство еще одной ГЭС на одном из притоков Селенги, переброска стока в пустыню Гоби и др.

Наблюдаемая активизация хозяйственной деятельности в северных районах Монголии происходит на фоне изменений климата, сопровождающихся снижением количества атмосферных осадков в бассейне р. Селенги и, как следствие, ее водности [5]. По данным Геологического института Монголии, из зарегистрированных в стране 5655 рек и ручьев уже иссякли 683 водотока. В этой ситуации рост водопотребления и водоотведения вместе с нарушениями подстилающей поверхности, в том числе деградации и опустынивания земель [6], усугубляют негативное воздействие на водные ресурсы территории и могут способствовать снижению водности Селенги и качества ее вод.

Цель настоящей работы – исследовать сезонную изменчивость главных ионов, следовых элементов и некоторых других характеристик в воде р. Селенги на территории России, выявить основные факторы, влияющие на

их динамику, дать современную экологическую оценку вод по исследуемым компонентам.

2. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ, ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКАЯ И ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ БАСЕЙНА Р. СЕЛЕНГИ

Бассейн р. Селенги (447 тыс. км²) расположен практически в центре Азиатского материка между 41 и 53° с. ш. и 98 и 113° в. д. на территории двух государств – Монголии и России (рис. 1). Он входит в состав бассейна оз. Байкал (570 тыс. км², [7]) и составляет его главную часть (78 %). Большая часть бассейна р. Селенги (299 тыс. км²) расположена на территории Монголии (67 %) в полуаридной зоне со средним уровнем атмосферных осадков около 300 мм/год [8]. Российская часть бассейна р. Селенги (148 тыс. км²) расположена в более влажной зоне, со средним уровнем атмосферных осадков 460 мм/год [9].

Бассейн р. Селенги имеет хорошо развитую речную сеть. Средняя густота речной сети изменяется в довольно широких пределах от 0.2 до 1.0 км/км², составляя на территории России в среднем 0.47 км/км² [10].

Река Селенга соединяет два водоема – оз. Хубсугул и оз. Байкал – и является главным притоком последнего. Ее длина составляет 1024 км, из них 409 км в пределах российской территории. Селенга поставляет около 50 % водного и более половины химического стока в оз. Байкал [11]. Среднегодовое водное стока реки составляет около 29 км³ [12]. В последнее десятилетие отмечается снижение водности реки ниже многолетней средней нормы на 22 % [5]. Снижение расходов воды привело к снижению выноса рекой растворенных веществ и наиболее отчетливо проявляется в периоды низкой водности. Из-за низкой водности реки в период 1996–2005 гг. ионный сток Селенги в среднем был на 20 % ниже нормы (4.1 млн т/год), а в наиболее маловодный 2002 г. – на 32 % [5].

Большая удаленность рассматриваемой территории от морских побережий, закрытость горами и преобладание горного рельефа обуславливают здесь резко континентальный климат. Основными особенностями климата являются большая амплитуда колебаний

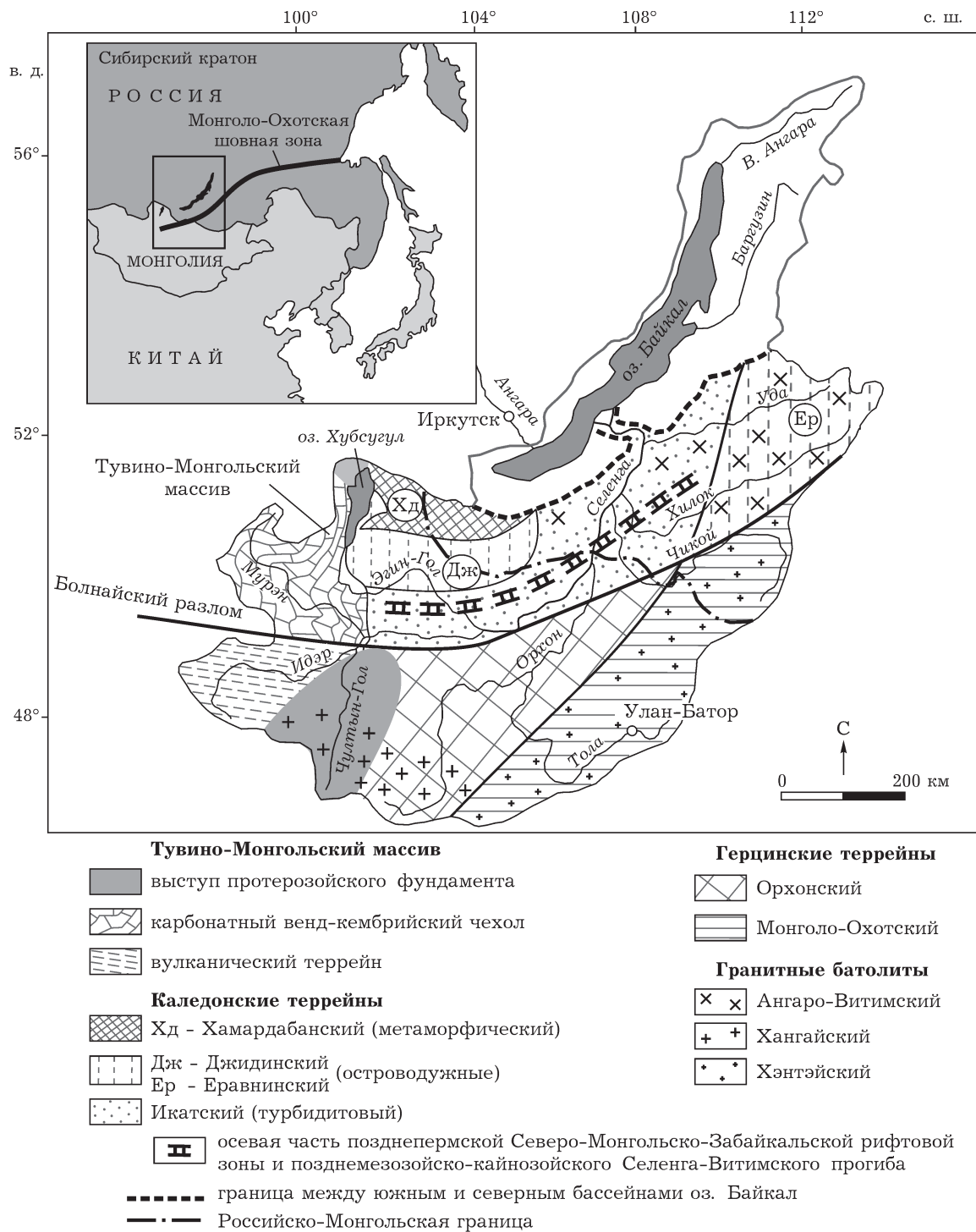


Рис. 1. Карта-схема тектоно-стратиграфических террейнов бассейна р. Селенги.

среднесуточных и сезонных температур воздуха, значительная его сухость, резкая смена сезонов, холодная продолжительная зима, преобладание ясного неба, особенно в холодную половину года. Средняя годовая температура воздуха повсеместно отрицательная и

изменяется от $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ в северной и центральной частях бассейна до $-0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ – в южной.

Геологическая структура бассейна р. Селенги сформировалась в результате закрытия Монголо-Охотского залива Палеоокеана в конце юрского периода [13] (см. рис. 1).

Тектоно-стратиграфические террейны северного и южного флангов Монголо-Охотской шовной зоны существенно различаются между собой по составу и возрасту. На северном фланге находятся каледониды, сформировавшиеся вдоль неопротерозойских массивов, аккретированных к Сибирскому кратону в раннем палеозое. На южном фланге расположены вулканогенно-осадочные комплексы герцинид, прорванные гранитными батолитами [14]. Отличие состава пород террейнов, разделенных шовной зоной, может отражаться в вариациях растворенных компонентов вод р. Селенги и ее притоков, а генеральная картина существенно усложняется локальными вещественными аномалиями, связанными с концентрациями рудных залежей, например месторождениями редких металлов в гранитных батолитах [15, 16].

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

3.1. Отбор проб и пробоподготовка

Отбор проб воды на р. Селенге и ее притоках проводился в 2010 г. в контрольных точках (рис. 2) на всем протяжении российского участка реки – от границы с Монголией (п. Наушки) до впадения в оз. Байкал и в барьерной зоне озера на расстоянии до 7 км от устья р. Селенги. Пробы воды отбирали из основного русла р. Селенги (см. рис. 2), в приустьевых участках некоторых ее притоков (реки Джиды, Темник, Баянгол, Чикой, Уда), в некоторых озерах и протоках дельты и в поверхностном и придонном слоях барьерной зоны оз. Байкал. Отбор проб проводили в подледный период (10–17 марта), весной в половодье (18–24 мая), летом (20–28 июля) и осенью (27 сентября – 2 октября) в ходе наземных автомобильных экспедиций. В июле совместно с плановым отбором проб в контрольных точках проведена катамаранная экспедиция с целью подробного опробования реки (шаг 5 км) и притоков, автомобильный подъезд к которым затруднен (реки Хилок, Оронгой, Итанца). Сплав осуществлялся в течение трех дней на специально адаптированном катамаране “Турист-2”.

Для многоэлементного ICP-MS-анализа образцы отбирали шестиметровым полимер-

ным шестом в предварительно отмытые 0.5-литровые полиэтилентерефталатные (ПЭТ) бутылки и хранили в течение дня в переносном термоэлектрическом холодильнике EVERCOOL EC-985 (температура ~ 10 °C). Отбренные образцы фильтровали через 0.45 мкм одноразовые мембранные фильтр-насадки (GyroDisc Syr. CA-PC 30 мм, ацетат целлюлозы, Orange Scientific, Бельгия). Для элементного анализа пробы фиксировали дважды перегнанной раствором 70 % HNO_3 (ОСЧ 18-4, ГОСТ 11125–84, суббойлинговая перегонка duoPUR фирмы Milestone), содержащей 350 мкг/л индия (в качестве внутреннего стандарта) из расчета 206 мкл кислоты на 10 мл пробы (в пробах концентрация HNO_3 составляла 2 %, $\text{In} = 10$ мкг/л). Подготовленные растворы до начала измерений хранили в холодильнике.

Образцы воды для определения катионов (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+), анионов (HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-}), Si и органического вещества отбирали в 1.5-литровые ПЭТ бутылки в контрольных точках. Образцы воды фильтровали через мембранные фильтры (0.45 мкм, поликарбонат) не позднее, чем через 10 ч после отбора. Фильтраты хранили в холодильнике до выполнения анализов.

Определение температуры воды и pH, а также фиксацию растворенного кислорода проводили на месте отбора проб в контрольных точках. Для измерения pH использовали потенциометр “Эксперт-002” (Эконика-Эксперт, Россия) с комбинированным электродом и термокомпенсатором. Погрешность метода ± 0.02 pH.

3.2. Определение главных ионов, кремния, кислорода и органического углерода

Химические анализы воды выполнены в аккредитованной Лаборатории гидрохимии и химии атмосферы Лимнологического института (ЛИН) СО РАН по методикам и руководящим документам, общепринятым в гидрохимии пресных вод суши [17, 18], а также разработанным и аттестованным в ЛИН [19].

3.3. Многоэлементный ICP-MS-анализ

Многоэлементный ICP-MS-анализ выполнен в Лаборатории элементного анализа ЛИН

ТАБЛИЦА 1

Ошибки определения элементов при измерении растворов на квадрупольном ICP-MS спектрометре Agilent 7500ce.

| Концентрация элементов, мкг/л | <0.001 | 0.001–0.1 | 0.1–1 | >1 |
|-------------------------------|--------|-----------|-------|----|
| RSD, % | > 25 | 25–10 | 10–5 | 5 |

СО РАН. Подготовленные образцы анализировали без концентрирования на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500ce. Для калибровки масс-спектрометра использовали многоэлементные стандартные растворы ICP-MS-68A-A и ICP-MS-68A-B (HIGH-PURITY STANDARDS, Charleston, USA), а также образец байкальской бутылированной воды (Na, Mg, Si, S, Cl, K, Ca [20]). Корректировку на интерферирующие молекулярные ионы (MeO^+ , MeOH^+ , MeAr^+ , MeCl^+) проводили с использованием подхода, описанного в работе [21].

Для оценки ошибок определения использовалась экспериментально установленная зависимость коэффициента вариации (RSD, %) от величины аналитического сигнала (N , имп./с), которая в рамках статистики Пуассона (квазипериодические процессы) была аппроксимирована степенной функцией $\text{RSD} (\%) = 125.71N^{-0.33103}$, где $N = 20\text{--}20\ 000$ имп./с. Сигналы величиной более 20 000 имп./с характеризуются величиной RSD, равной 5 % и лучше, сигналы величиной менее 20 имп./с характеризуются величиной RSD более 50 %.

Типичные ошибки определения элементов в зависимости от их концентрации в измеряемых растворах представлены в табл. 1.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для того чтобы выявить основные группы элементов, принципиально различающиеся по характеру пространственно-временного распределения в р. Селенге, часть данных (в контрольных точках основного русла, см. рис. 2) была подвергнута факторному анализу (метод главных компонент, метод вращения факторных нагрузок – варимакс). Анализировали распределение следующих компонентов: растворенный кислород (O_2), кислотность (H^+ , мкг/л), главные ионы (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-}) и их сумма (СГИ), растворенный органический углерод (РОУ), кремний (Si), следовые элементы (Li,

Be, B, Al, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, Sn, Sb, I, Cs, Ba, сумма РЗЭ, Hf, W, Re, Tl, Pb, Bi, Th, U).

Было выявлено четыре факторные группы, включающие практически все исследуемые компоненты (рис. 3–6). Состав этих групп не всегда однозначен, поскольку пространственно-временное распределение некоторых элементов находится под влиянием нескольких факторов.

4.1. Факторная группа 1 “Минерализация”

Первая факторная группа (см. рис. 3) включает минерализацию воды (РОУ), главные ионы и некоторые консервативные следовые элементы (B, Br, Sr, Mo, Ba, Re, U). Концентрация большинства элементов максимальна в подледный период (март) и минимальна в период половодья (май), повышена на границе с Монголией и уменьшается к устью (см. рис. 3) по мере разбавления менее минерализованными водами притоков р. Селенги (см. рис. 2). Наиболее сильное разбавление наблюдается после впадения самого крупного притока – р. Чикой, – доля которого в стоке р. Селенги на данном участке составляет в среднем 38.5 % (рассчитано по среднегодовым многолетним данным за период 1987–1997 гг., данные взяты с сайта R-ArcticNET по адресу <http://www.r-arcticnet.sr.unh.edu/v4.0/index.html>). Вклад других рек в сток р. Селенги на соответствующих участках значительно ниже: р. Джиды – 18.6 %, р. Темник – 5.3 %, р. Хилок – 11 %, р. Оронгой – 1 %, р. Уда – 7 %, р. Итанца – 1 %. Из притоков только р. Джиды имеет минерализацию выше, чем Селенга (на 4–20 % в зависимости от сезона).

Концентрация элементов факторной группы 1 в притоках ниже, чем в р. Селенге. Исключение составляют р. Уда (Cl – зимой и осенью, B, Na, SO_4^{2-} – зимой, Mo – во все сезоны) и р. Джиды (Na, Ba – зимой, Br – летом, Ca, Mg, SO_4^{2-} , Sr – во все сезоны года).

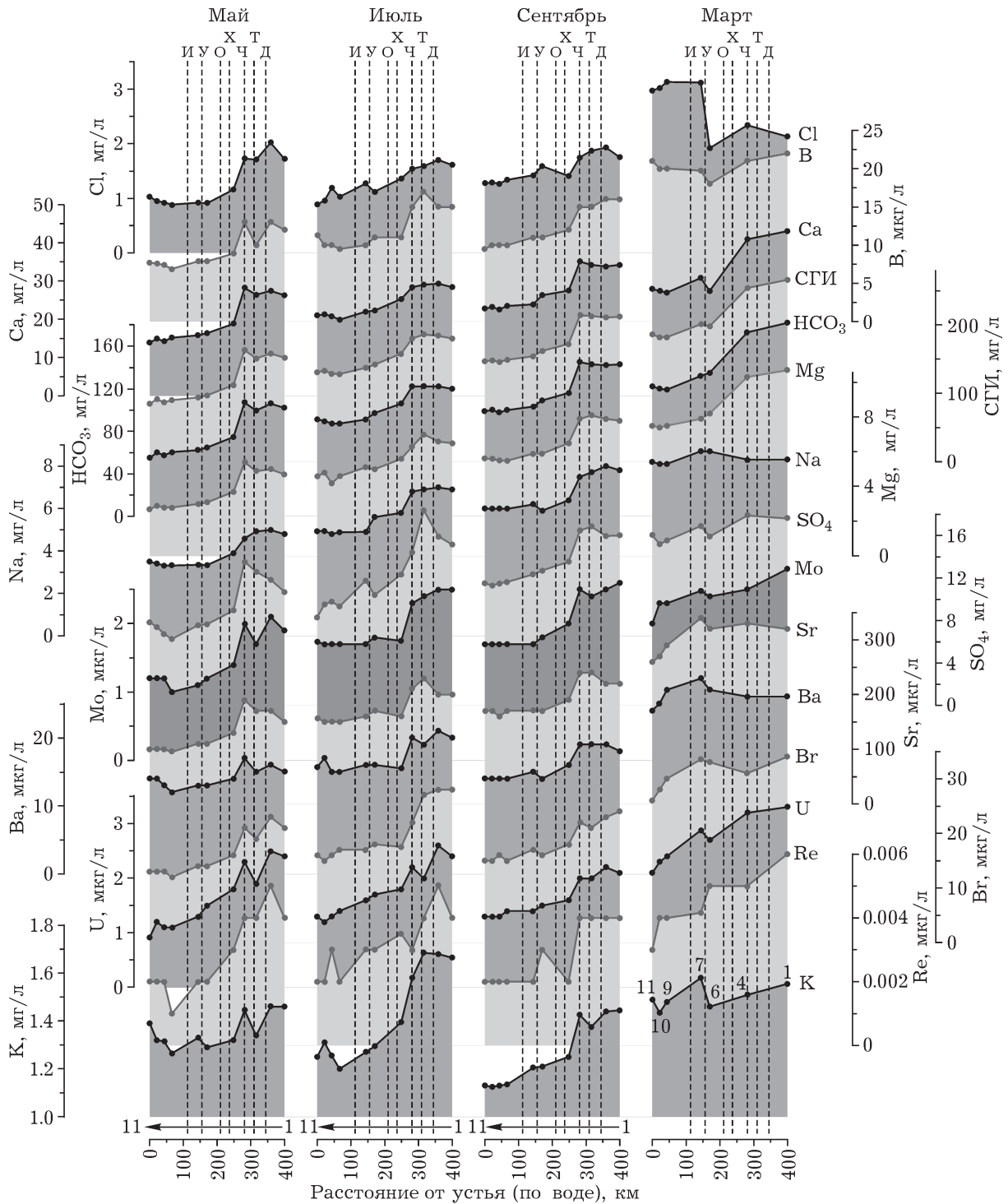


Рис. 3. Пространственно-временное распределение компонентов в р. Селенге (основное русло), входящих в факторную группу 1 “Минерализация”. Здесь и на рис. 4, 5: вертикальными линиями отмечено положение притоков (И – р. Итанца, У – р. Уда, О – р. Оронгой, Х – р. Хилок, Ч – р. Чикой, Т – р. Темник, Д – р. Джида); цифрами внизу отмечены контрольные точки отбора проб воды вблизи пунктов: 1 – п. Наушки, 2 – п. Зарубино, 3 – п. Селендума, 4 – п. Новоселенгинск, 5 – п. Дэдэ-Сутой, 6 – выше Улан-Удэ, 7 – ниже Улан-Удэ, 8 – п. Селенгинск, 9 – п. Кабанск, 10 – п. Мурзино, 11 – пр. Харауз.

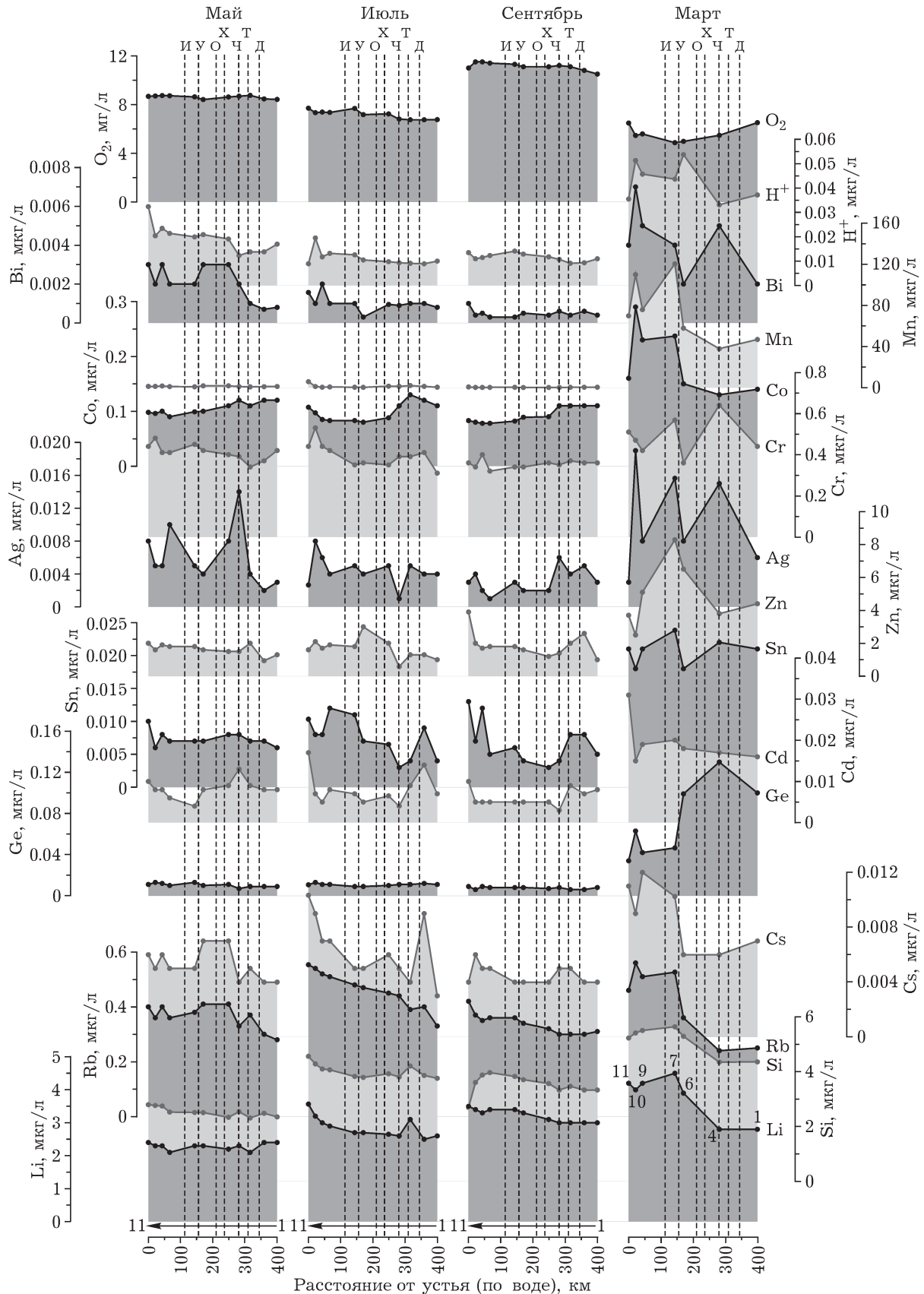


Рис. 5. Пространственно-временное распределение компонентов в р. Селенге (основное русло), входящих в факторную группу 3 “Кислотность / кислород”. Обозн. см. рис. 3.

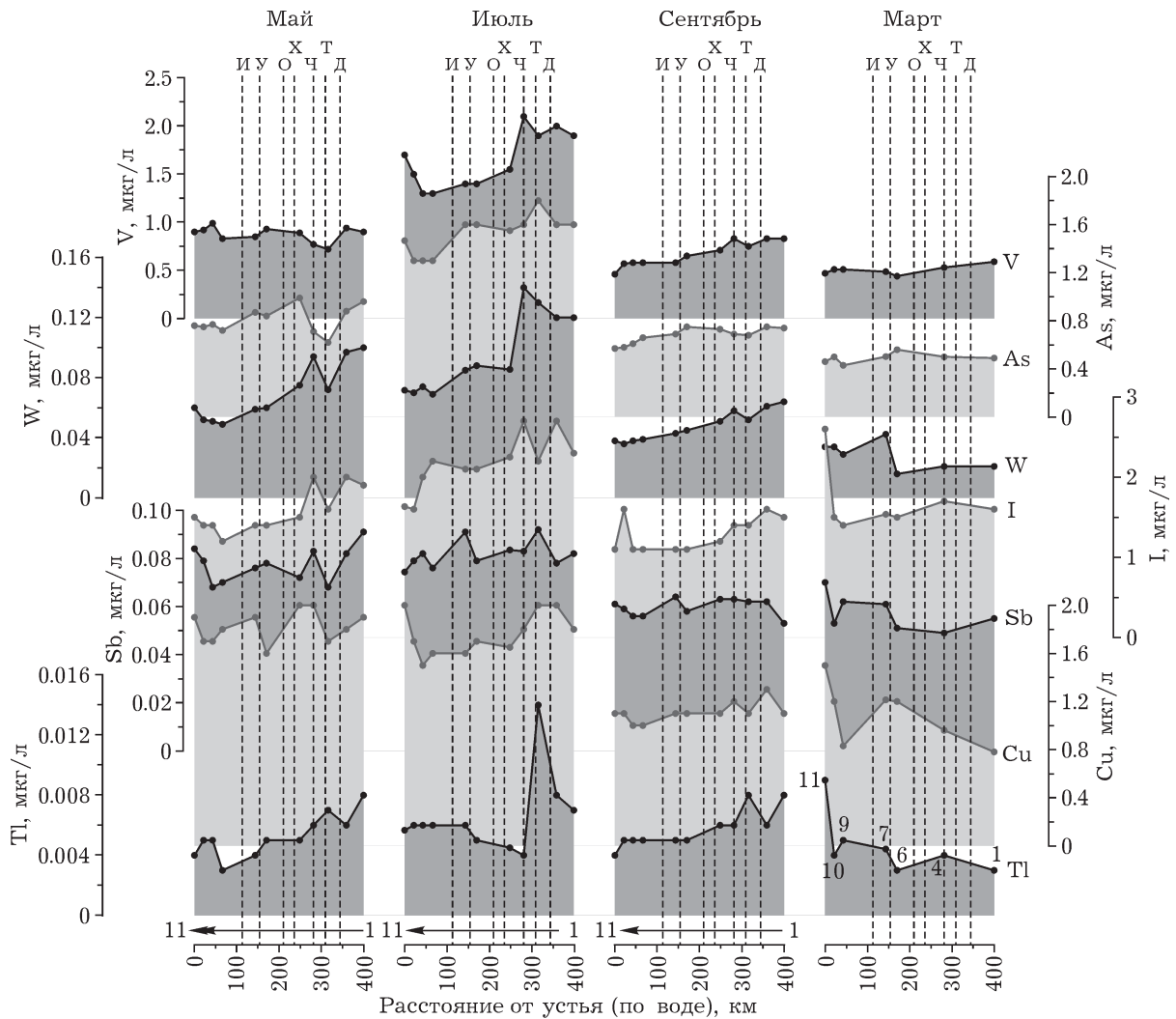


Рис. 6. Пространственно-временное распределение компонентов в р. Селенге (основное русло), входящих в факторную группу 4, а также Tl, не вошедшего ни в какие группы. Обозн. см. рис. 3.

Среди рассматриваемых элементов общая закономерность нарушается для калия, концентрация которого в июле на участке до впадения р. Чикой выше, чем в зимний период, что наряду с элементами четвертой факторной группы (V, As, W, I, Sb, Cu) указывает на вероятный трансграничный перенос со стороны Монголии. Возможно, что повышенные концентрации калия связаны с эрозией пахотных земель, разработка которых в последнее время активно осуществляется на территории Монголии в приграничных районах [2]. Концентрация других элементов факторной группы 1 всегда выше зимой, в период пониженного водного стока [22]. Для некоторых элементов данная закономерность нарушена: их

средняя концентрация осенью почти такая же, как и летом (B, Mo, Sr), в ряде случаев осенью ниже, чем летом (Br, U, Re), а для калия осенью ниже, чем весной (см. рис. 3).

В зимний период нарушается пространственная закономерность распределения некоторых элементов: концентрация B, Na, Ba, K слабо меняется вдоль русла реки, а концентрация Cl после г. Улан-Удэ резко возрастает (в 1.5 раза). Вероятно, это обусловлено увеличением доли подземных вод другого химического состава в питании реки на данном участке. Предыдущими исследованиями [23] установлено, что на рассматриваемом участке имеется наслоение нескольких типов водоносных комплексов (четвертичных, пли-

оценовых, миоценовых и среднеюрских отложений), под которыми находятся воды кристаллических пород фундамента. Выше п. Селенгинск начинается зона Селенга-Витимского прогиба с другими условиями формирования подземного стока, где наблюдаются выходы термальных вод (в районе п. Ильинка), а ближе к Улан-Удэ имеется небольшая область с исключительно высоким модулем подземного питания (более 10 л/(с · км²) [7]. Вероятно, наличие этой области обуславливает высокие концентрации ряда элементов в р. Селенге на участке ниже Улан-Удэ в зимний период (см. рис. 3, 5).

Сходство в характере пространственно-временного распределения главных ионов и

следовых элементов обусловлено, скорее всего, общими источниками их поступления. Большая часть щелочноземельных металлов (Mg, Ca, Sr, Ba) и U, вероятно, извлекается из карбонатных пород. Уран в условиях щелочности р. Селенги образует устойчивые хорошо растворимые гидрокарбонатные комплексы и ведет себя как консервативный элемент [24]. Элементы Mo и Re в речные воды поступают главным образом из сульфидных и некоторых акцессорных минералов: Mo из молибденита (MoS₂), магнетита, сфена, Re из ReS₂, ReS₃, CuReS₄ и др. [25]. Эти элементы в окислительных условиях так же, как и сера, мигрируют в виде хорошо растворимых оксоанионов (MoO₄²⁻, ReO₄⁻). Средневзвешенные

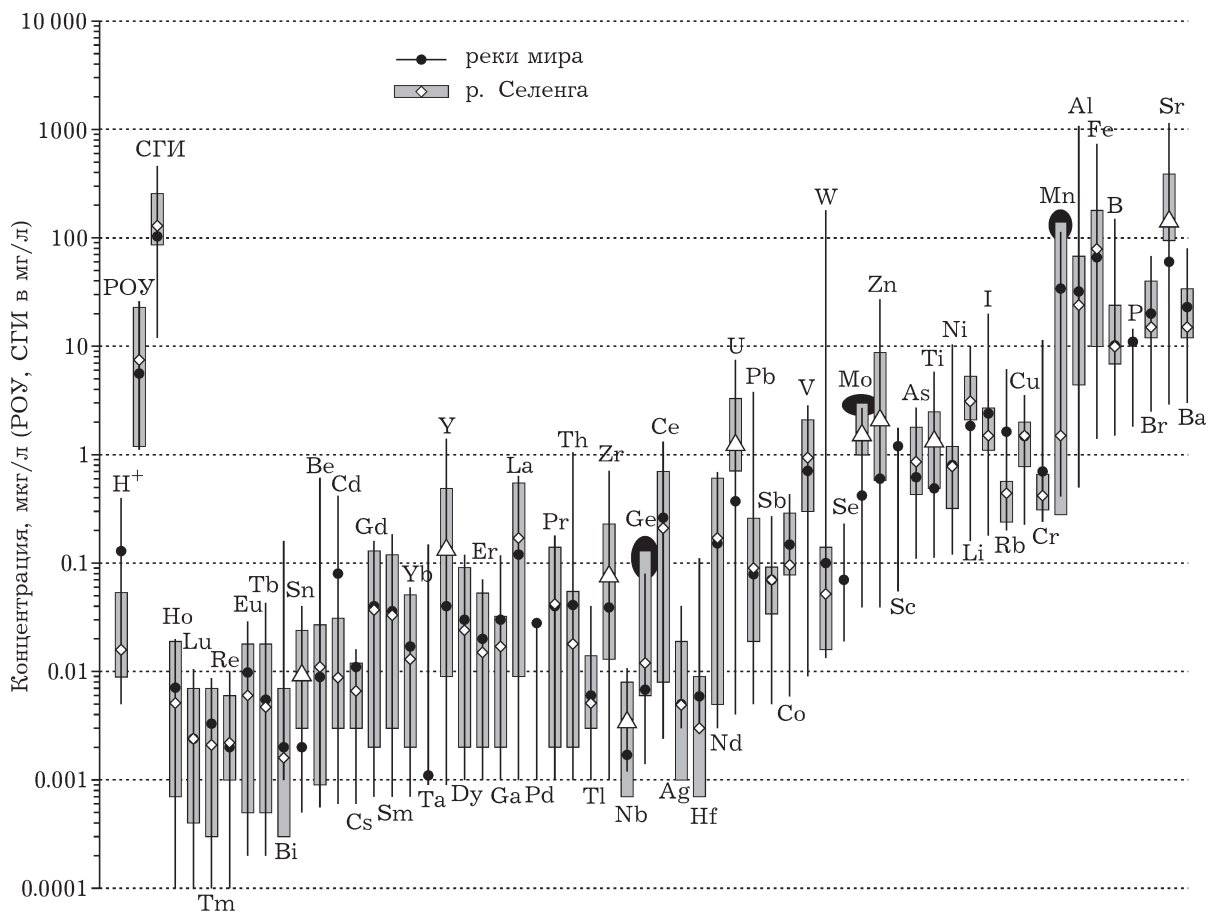


Рис. 7. Концентрации H⁺, PO₄, SO₄ и следовых элементов в р. Селенге (фракция <0.45 мкм) в сопоставлении с показателями ГПРФ, установленными по результатам исследования крупнейших рек мира, находящихся в зонах с низкой антропогенной нагрузкой (данные [37], уточненные и дополненные: по [38] – Ag; [25] – Mo, Re; [39] – Tl; [40] – Br; [41] – Br, I; [42, 43] – I; [33, 35, 44] – Sn; [45–48] – Bi). Барями показаны диапазоны колебаний концентраций элементов, символами – средневзвешенные величины; треугольниками отмечены средневзвешенные концентрации элементов в р. Селенге, превышающие показатели глобального природного речного фона более чем в 2 раза; превышение максимальных показателей отмечено черными эллипсами.

концентрации Re и SO_4^{2-} находятся в соотношениях, характерных для экологически чистых рек [25], что свидетельствует об отсутствии техногенного загрязнения по рению.

Максимальная (3 мкг/л) и средневзвешенная (1.6 мкг/л) концентрации Mo в р. Селенге превышают аналогичные показатели глобального природного речного фона (ГПРФ) на 10 % и в 3.8 раза соответственно (рис. 7). Для выявления причин повышенных концентраций Mo в р. Селенге мы провели балансовые оценки поступления Mo в оз. Байкал. Установлено, что концентрация Mo в оз. Байкал везде постоянна (не меняется ни по вертикали, ни по горизонтали) и находится на уровне 1.3 мкг/л. При современном поступлении Mo в оз. Байкал с основными притоками (в июле р. Селенга – 1.7 мкг/л, р. Баргузин – 1.1 мкг/л, р. В. Ангара – 0.65 мкг/л при соответствующих месячных многолетних расходах воды 1884, 246 и 604 м³/с; данные с сайта R-ArcticNET) его оценочная концентрация в озере составляет 1.4 мкг/л, что совпадает с наблюдаемыми величинами (1.3 мкг/л). Исходя из данных оценок и учитывая малую скорость обмена воды в озере (~400 лет) [26], можно заключить, что повышенная концентрация Mo в р. Селенге носит природный характер, а не является следствием антропогенного влияния со стороны горно-обогатительного комбината “Эрдэнэт” в Монголии, где перерабатывают молибденовый концентрат. В любом случае имеющихся данных недостаточно, для того чтобы выявить и правильно оценить степень влияния комбината на р. Селенгу. Для этого необходимо провести более подробные исследования на монгольской территории (выше и ниже г. Эрдэнэт по стоку р. Орхон – притока р. Селенги).

Концентрация Mo в притоках заметно ниже, чем в р. Селенге, за исключением р. Уды, где наблюдаются повышенные концентрации Mo во все сезоны, особенно зимой (5 мкг/л), однако это не влияет на уровень концентрации Mo в р. Селенге.

В зимний период концентрация некоторых других элементов (Cl, B, Sb, Ga, Ge, W, Bi) в р. Уде была также заметно выше (в 3–10 раз), чем в р. Селенге. Не исключено, что в это время на фоне пониженной водности проявляется влияние Улан-Удэ – крупного про-

мышленного центра (около 60 предприятий, 400 тыс. жителей), который протянулся вдоль обоих берегов реки на 15 км от места ее слияния с р. Селенгой (см. рис. 2).

Максимальная концентрация Sr в р. Селенге ниже соответствующего показателя ГПРФ, однако средневзвешенная концентрация Sr (150 мкг/л) выше значений ГПРФ в 2.5 раза (см. рис. 7). Так же, как и в случае с Mo, массовый баланс Sr в оз. Байкал [27, 28] свидетельствует о естественных причинах повышенной концентрации Sr в р. Селенге.

Средневзвешенная концентрация U (1.3 мкг/л) в р. Селенге превышает аналогичный показатель ГПРФ в 3.5 раза (см. рис. 7), что, по-видимому, также определяется природными особенностями водосборного бассейна.

Концентрации элементов данной группы в р. Селенге и остальных исследованных водных объектах (притоки, протоки, озера дельты, барьерная зона оз. Байкал) не превышают российских нормативов, установленных для вод объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования [29], воды объектов питьевого [30, 31] и рыбохозяйственного [32] назначения. Исключение составляют Mo и Sr, концентрации которых превышают рыбохозяйственные нормативы.

Концентрация Mo в р. Селенге превышает российские рыбохозяйственные нормативы (ПДК = 1 мкг/л) до 2.8 раз во все сезоны на всем протяжении реки. В дельте р. Селенги и в барьерной зоне оз. Байкал концентрация Mo также превышает рыбохозяйственные нормативы во все сезоны (1.1–2.1 ПДК).

Концентрация Sr превышает рыбохозяйственные нормативы (ПДК = 400 мкг/л) зимой в р. Джида (1.3 ПДК), в некоторых протоках (пр. Колпинная – 1.5 ПДК, пр. Средняя – 2.4 ПДК) и озерах дельты (оз. Заверняиха и оз. Березовое – 2.1 ПДК), а также весной и осенью в р. Баянгол (1.1–1.2 ПДК), которая вытекает из оз. Гусиное и впадает в р. Темник в 4.5 км от ее устья (см. рис. 2).

4.2. Факторная группа 2 “Органическое вещество”

Вторая факторная группа включает растворенное органическое вещество (в пересчете на углерод) и ряд трудно растворимых и

практически нерастворимых элементов: Be, Al, Ti, Fe, Ni, Cu, Ga, Y, Zr, Nb, Hf, PЗЭ, Pb, Th (см. рис. 4). Многочисленными исследованиями показано, что данные элементы мигрируют преимущественно в составе тонкодисперсных Fe–Al коллоидов (>50 кДа), стабилизированных органическим веществом, наличие которого является решающим фактором в их формировании и количественном выражении [33, 34]. Генезис такого органического вещества связан главным образом с верхним почвенным горизонтом – подстилкой [33]. В наших исследованиях наибольшее содержание органического вещества и мобилизуемых им элементов наблюдается весной, в период активного таяния снежного покрова и выноса этого компонента из верхних горизонтов почв (см. рис. 4). В этот период концентрации элементов заметно повышаются после впадения р. Чикой, особенно Y, PЗЭ, Th, Fe, Ga, Al, Ti. Содержание органического вещества в р. Чикой максимальное (РОУ – 22 мг/л) среди других притоков и в 2–3 раза выше, чем в р. Селенге до впадения р. Чикой. Концентрация растворенного органического вещества в р. Селенге растет в направлении от Монголии к Байкалу; в этом же направлении растет и концентрация связанных с ним элементов. Медь также входит в данную группу, однако не имеет выраженного пространственного тренда (см. рис. 4), что может указывать на влияние других контролирующих факторов, вероятно, сорбционных и ионообменных процессов при взаимодействии с взвешенным веществом, поглощением биотой.

В сезонной динамике наблюдается уменьшение концентрации РОУ от весны к осени с небольшим увеличением в зимний период (см. рис. 4). Подобным образом изменяется и концентрация большинства элементов в группе. Исключение составляют Nb и Hf, концентрации которых в зимний период сопоставимы с их значениями весной, а пространственное распределение имеет, скорее, обратный характер (концентрация элементов уменьшается от Монголии к Байкалу). Концентрация меди в р. Селенге летом, как и весной, повышенная (1.5–2 мкг/л) и так же слабо меняется вдоль русла реки.

Весной, летом и зимой пространственный тренд увеличения концентрации большинства элементов в р. Селенге направлен от Монго-

лии к Байкалу. Осенью этот тренд практически отсутствует, а у Ti и Cu меняется на противоположный (см. рис. 4).

Средневзвешенные концентрации ряда элементов факторной группы 2 (Be, La, Pr, Nd, Fe) в р. Селенге немного выше (в 1.1–1.4 раза) аналогичных показателей ГПРФ (см. рис. 7). Превышение средневзвешенных показателей по другим элементам несколько больше (Zr, Nb – в 2.1 раза, Ti – в 2.9 раза, Y – в 3.5 раза). Трудно предположить наличие антропогенных источников для некоторых специфичных элементов (Be, Zr, Nb, Y, PЗЭ). Мы полагаем, что повышенные концентрации трудно растворимых элементов в р. Селенге есть результат действия геологических и природно-климатических факторов.

Концентрация элементов данной группы в р. Селенге и других исследованных водных объектах не превышает российских нормативов. Исключение составляют Cu, Al и Fe, концентрация которых превышает рыбохозяйственные нормативы.

Весной и летом концентрация Cu в р. Селенге постоянна, но в незначительной степени (1.5–2 раза) превышает достаточно жесткие российские рыбохозяйственные нормативы (ПДК = 1 мкг/л). Осенью и зимой концентрация меди в реке уменьшается (0.8–1.5 мкг/л), однако в большинстве случаев также превышает ПДК. Концентрация меди в притоках ниже, чем в р. Селенге, или сопоставима с ней. Превышения ПДК в притоках зафиксированы весной и летом в р. Чикой (2.2 и 1.1 ПДК) и р. Джиды (1.7 и 1.3 ПДК). В барьерной зоне оз. Байкал концентрация меди уменьшается с расстоянием от берега и не превышает 2 ПДК. Нельзя сказать однозначно, что данные “нарушения” вызваны антропогенным влиянием, поскольку как максимальные, так и средневзвешенные концентрации меди в р. Селенге сопоставимы с показателями глобального природного речного фона (см. рис. 7). Более того, содержание меди в реках зависит от конкретных геологических и климатических особенностей их бассейнов и может достигать весьма высоких значений (например, 5 мкг/л) в реках бассейна р. Нижней Тунгуски и р. Кочечумы (входят в бассейн р. Енисей), которые, безусловно, находятся в экологически чистых районах [33, 35].

Весной и летом на некоторых участках р. Селенги фиксируются небольшие (до 1.7 раза) превышения рыбохозяйственных нормативов по Al (ПДК = 40 мкг/л). В весенний период это связано с высоким содержанием органического вещества, а летом, вероятно, обусловлено аномально большой мутностью воды (см. подраздел 4.4). В притоках превышение нормативов зафиксировано в трех случаях: весной в р. Чикой (2.5 ПДК) и р. Темник (1.3 ПДК), летом в р. Уде (1.1 ПДК).

Небольшое (менее 1.8 раза) превышение рыбохозяйственных нормативов по Fe (ПДК = 100 мкг/л) наблюдается в р. Селенге весной на участке ниже впадения р. Чикой, а также в р. Чикой (2.1 ПДК) и р. Уде (1.8 ПДК). В протоках и озерах дельты концентрация Fe весной также превышает нормативы (1.4–2.6 ПДК). В отдельных случаях нарушения нормативов в озерах дельты фиксируются и в другие сезоны: летом – оз. Семеновское (1.2 ПДК) и оз. Березовое (1.9 ПДК), осенью – оз. Семеновское (2 ПДК), зимой – оз. Заверняиха (1.2 ПДК) и оз. Березовое (49 ПДК). Главные причины повышенных концентраций Fe в воде связаны с природными процессами – интенсивным выносом органоминеральных комплексов из верхних горизонтов почвы в период половодья и мобилизацией Fe из донных отложений (см. подраздел 4.3).

Концентрация Fe в р. Селенге сопоставима с показателями ГПРФ: максимальная концентрация Fe ниже максимальных значений в 4 раза, а средневзвешенная немного превышает (на 20 %) его (см. рис. 7).

4.3. Факторная группа 3 “Кислотность/кислород”

Третья факторная группа включает Si, Li, Cr, Mn, Co, Zn, Ge, Rb, Ag, Cd, Sn, Cs, Bi, кислотность (H^+) и растворенный кислород (O_2). Их концентрации в р. Селенге, также как и для факторной группы 2, растут от Монголии к Байкалу, однако наибольшие значения наблюдаются в подледный период (март), за исключением O_2 . Концентрация O_2 , наоборот, минимальна в это время и максимальна осенью (см. рис. 5).

Главным управляющим фактором для этих элементов, по-видимому, является кислот-

ность среды на фоне сезонной динамики растворенного кислорода, а также влияние других факторов, значительно повышающих концентрацию большинства элементов в зимний период (см. рис. 5). Такими факторами могут быть подземные воды и/или процессы мобилизации элементов из илистых отложений, роль которых в зимний период должна возрастать, поскольку в этот период заметно меняются физико-химические условия (T , рН, O_2) и снижается водность рек.

Все притоки, кроме р. Джиды, в течение года более кислые по сравнению с водами р. Селенги и содержат, как правило, чуть больше растворенного кислорода. Поэтому вполне закономерно, что по мере разбавления притоками кислотность и содержание кислорода в р. Селенге растут. Концентрация Rb в притоках также более высокая, чем в р. Селенге, за исключением р. Уды в сентябре и р. Джиды в марте. Концентрация других элементов факторной группы 3 в притоках в целом сопоставима с таковой в р. Селенге, однако в отдельных случаях имеются существенные отклонения в ту и другую сторону.

Учитывая сложный характер влияния различных факторов, в данной группе элементов имеется больше исключений. В зимний период на участке р. Селенги ниже Улан-Удэ наблюдается заметное увеличение концентраций Bi, Mn, Co, Cs, Rb, (так же, как Cl и некоторых других элементов факторной группы 1, см. подраздел 4.1), в то время как концентрация Ge, наоборот, значительно падает (см. рис. 5). Концентрации таких элементов, как Si и Li, начинают заметно повышаться гораздо выше по течению, после впадения р. Чикой, а концентрации остальных элементов почти не меняются (Sn, Cd) или сильно флуктуируют (Cr, Ag). Возможно, это свидетельствует о наличии нескольких типов подземных вод или других источников поступления элементов. Другим исключением является Co, концентрация которого весной, летом и осенью падает по направлению к Байкалу, и по пространственному распределению он похож на факторную группу 1 (см. подраздел 4.1 и рис. 3).

В сезонной динамике весна – лето – осень мы не видим одинаковой картины распределения для всех элементов: тип пространственного распределения сохраняется (кроме Co),

однако градиент и средние концентрации элементов в р. Селенге меняются по-разному (см. рис. 5). Средние концентрации Bi, Mn, Cr и Ag уменьшаются от весны к осени, Zn, Sn и Cd – почти не меняются, Ge – одинакова весной и летом, но немного меньше осенью, Cs, Rb – выше летом, Si – почти одинаковы летом и осенью, но в 1.5 раза ниже весной, Li – растёт от весны к осени.

Концентрации элементов данной группы в р. Селенге и других исследованных водных объектах не превышают российских нормативов, за исключением Mn в зимний период.

Концентрация Mn в реках зимой значительно возрастает (38–120 мкг/л, за исключением р. Джиды – 4.4 мкг/л) по сравнению с другими сезонами (0.28–6 мкг/л) и постоянно превышает рыбохозяйственные нормативы (ПДК = 10 мкг/л), а в отдельных случаях (ниже Улан-Удэ – 120 мкг/л, п. Мурзино – 110 мкг/л) выше российских нормативов для питьевой воды, хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования (ПДК = 100 мкг/л), однако не превышает нормативов для питьевой воды, рекомендуемых ВОЗ (400 мкг/л). Концентрация Mn зимой в некоторых протоках и озерах дельты гораздо больше, чем в р. Селенге, и превышает российские нормативы для питьевой воды в 4.6–88 раз.

Значительное изменение концентрации Mn (почти в 70 раз) в сезонном цикле приводит к существенной разнице при сопоставлении с показателями глобального речного фона: средневзвешенная концентрация Mn в р. Селенге значительно ниже (в 23 раза), а его максимальная концентрация немного выше (на 10 %) соответствующих характеристик ГПРФ.

Существенное увеличение концентрации Mn зимой, как в самой р. Селенге, так и в ее притоках, свидетельствует о естественных (природных) процессах мобилизации этого элемента. По-видимому, Mn поступает с подземными водами или мобилизуется из илистых отложений [36]. Процессам мобилизации Mn также способствуют болотистый ландшафт и понижение скорости течения [36]. Известно, что Mn чувствителен к Red/Ox потенциалу и в умеренных окислительных условиях мигрирует главным образом (~90 %) в виде взвешенных форм [33, 35]. Измерение E_h воды не производилось, поэтому труд-

но оценить термодинамические условия существования растворимых форм марганца. Однако более кислая среда (pH 6.95–7.48) и пониженная концентрация растворённого кислорода в воде (4.2–6.5 мг/л) зимой по сравнению с другими сезонами в большей степени благоприятствует как мобилизации Mn из илистых отложений и взвеси, так и нахождению его в истинно растворимой форме (Mn²⁺). Возможно, что очень низкая концентрация Mn в р. Джиде зимой (4.4 мкг/л) – это следствие менее благоприятных физико-химических условий (O₂ – 7.23 мг/л, pH 7.65) по сравнению с остальными реками.

Процессы мобилизации Mn из речных отложений наиболее сильно выражены в дельте р. Селенги. Концентрация Mn зимой в протоках значительно больше, чем в основном створе реки (пр. Средняя – 460 мкг/л, пр. Колпинная – 3300 мкг/л), и еще больше в некоторых дельтовых озерах (оз. Березовое – 6000 мкг/л, оз. Заверняиха – 8800 мкг/л), существенно превышая любые нормативы. В оз. Березовое наряду с высоким содержанием Mn наблюдаются также максимальные концентрации Fe (4900 мкг/л) и As (20 мкг/л). Это изолированное заморное озеро в дельте р. Селенги (см. рис. 2) с высоким содержанием органического вещества. Зимой, при отсутствии кислорода, здесь создаются восстановительные условия, которые способствуют мобилизации Fe, Mn и диагенетически связанного с ними As из донных отложений в водное тело озера.

В барьерной зоне оз. Байкал концентрация Mn значительно падает, проходя геохимический барьер, и уменьшается с удалением от берега. Однако в придонном слое, как и в случае с Cd, наблюдаются на порядок более высокие концентрации (5.9–22 мкг/л), по сравнению с поверхностным (0.68–4.6 мкг/л).

4.4. Факторная группа 4

В четвертую факторную группу входят V, As, Sb, I, W и Cu, концентрации которых повышены летом, особенно на верхнем (0–120 км) участке реки (см. рис. 6). На этом участке также отмечено максимальное содержание калия (см. подраздел 4.1 и рис. 3) и таллия (см. рис. 6). В период весна – осень концент-

рации большинства элементов уменьшаются от Монголии к устью, а зимой (за исключением V, As, I), наоборот, повышаются (см. рис. 6). Концентрации V и Cu весной в отличие от других элементов практически не меняются вдоль русла. Средние концентрации элементов факторной группы 4 в р. Селенге увеличиваются от весны к лету (за исключением Cu), осенью значительно падают почти до уровня концентраций зимнего периода (см. рис. 6).

Летний период 2010 г. был аномальным для р. Селенги: температура воды в июле была 26 °С (обычно 22 °С), вода была мутная и содержала большое количество патогенной микрофлоры (О. С. Кравченко, устное сообщение).

Трудно определить, чем были вызваны повышенные концентрации данных элементов в р. Селенге в июле, однако, несомненно, что их мобилизация происходила главным образом на территории Монголии, поскольку концентрации элементов в притоках на территории России были заметно ниже (за исключением W, As, Sb – р. Чикой, W, Sb – р. Джиды).

Концентрация V летом в р. Уде, р. Селенге и протоках ее дельты, а также в поверхностной воде оз. Байкал на удалении до 2 км от берега, незначительно превышает рыбохозяйственные нормативы (ПДК = 1 мкг/л). Максимальное превышение ПДК в 2,4 раза зафиксировано в р. Селенге на участке до впадения р. Чикой (см. рис. 6).

Нельзя утверждать, что фиксируемый в июле слабый трансграничный перенос V, As, Sb, I, W, Cu оказывает значительную нагрузку на российскую часть р. Селенги, поскольку максимальные концентрации этих элементов ниже соответствующих уровней ГПРФ, а их средневзвешенные концентрации сопоставимы (только V и As незначительно (~30 %) превышают уровень ГПРФ, см. рис. 7). Антропогенный характер влияния по данным элементам также не очевиден.

4.5. Сравнение р. Селенги с глобальным природным речным фоном по следовым элементам

Концентрации следовых (<1 мг/л) элементов в р. Селенге (размах колебаний и средневзвешенные величины) были сопоставлены с ориентировочно установленными показателя-

ми ГПРФ (см. рис. 7). Основной массив данных по показателям ГПРФ взят из обзора [37], в котором собраны результаты исследований, проведенных с помощью современных методов (в основном ICP-MS), за предшествующее десятилетие в бассейнах трех десятков крупнейших рек мира, текущих в экологически чистых районах или зонах с низкой антропогенной нагрузкой. База данных обзора [37] была нами уточнена и дополнена по ряду элементов в ходе анализа литературы: [38] – Ag; [25] – Mo, Re; [39] – Tl; [40] – Br; [41] – Br, I; [42, 43] – I; [33, 35, 44] – Sn, [45–48] – Bi) – и представлена на рис. 7.

Средневзвешенные концентрации элементов в р. Селенге рассчитывали по усредненным значениям концентраций в нижнем течении реки на участке п. Кабанск – пр. Харауз. Данные по расходу воды (п. Кабанск) в соответствующих месяцах брали для 1997 г. (данные ArcticNET), наиболее близкого к гидрологической обстановке 2010 г. Размах колебаний концентраций элементов определяли по совокупности всех данных (все контрольные точки в основном створе реки, все сезоны).

Как следует из сопоставления, концентрации большинства элементов в воде р. Селенги не превышают уровня ГПРФ (см. рис. 7). Небольшие превышения максимальных концентраций отмечены для Mo (10 %) и Mn (10 %) и несколько выше по Ge (60 %). Средневзвешенные показатели превышены в 2–5 раз по Zr (2.1), Nb (2.1), Sr (2.5), Ti (2.9), U (3.5), Y (3.5), Zn (3.7), Mo (3.8) и Sn (4.9). Принимая во внимание, что показатели ГПРФ установлены ориентировочно и не учитывают конкретных природно-климатических и геологических особенностей формирования речного стока, нельзя утверждать, что обнаруженные превышения свидетельствуют об антропогенном влиянии.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследована сезонная динамика главных ионов, Si, следовых элементов, органического углерода, pH и растворенного кислорода в воде р. Селенги на территории России, а также в ее притоках, озерах и протоках дельты, в барьерной зоне оз. Байкал на расстоянии до

7 км от устья реки. Выявлены четыре группы компонентов химического состава вод, принципиально различающихся по характеру пространственно-временного распределения.

Первая группа элементов объединяет минерализацию воды, главные ионы и некоторые консервативные следовые элементы (В, Br, Sr, Mo, Ba, Re, U), что указывает на общие источники их поступления. Концентрации этих компонентов максимальны в подледный период (март) и минимальны в период половодья (май), повышены на границе с Монголией и уменьшаются к устью по мере разбавления менее минерализованными водами притоков реки. Наиболее сильное разбавление наблюдается после впадения главного притока – р. Чикой (~1/3 от суммарного водного стока р. Селенги). Пространственная закономерность нарушается для ряда элементов зимой: концентрации В, Na, Ba, К и особенно Cl повышаются относительно минерализации на участке реки ниже Улан-Удэ, вероятно, вследствие увеличения доли подземных вод другого химического состава в питании реки.

Фактор, определяющий поведение второй группы элементов, связан с содержанием растворенного органического вещества, способного переводить в тонкодисперсные органоминеральные комплексы трудно растворимые и практически нерастворимые элементы (Be, Al, Ti, Fe, Ni, Cu, Ga, Y, Zr, Nb, Hf, PЗЭ, Pb, Th). Концентрации этих элементов повышены весной, в период таяния снега и выноса органического вещества с водосборного бассейна. Наиболее значительное увеличение концентраций элементов в р. Селенге наблюдается после впадения р. Чикой, в которой отмечена наибольшая концентрация растворенного органического углерода (РОУ = 22 мг/л). Концентрация РОУ в р. Селенге увеличивается в направлении от Монголии к Байкалу; в этом же направлении растёт и концентрация связанных с ним элементов.

Факторы, действующие на третью группу элементов (Si, Li, Cr, Mn, Co, Zn, Ge, Rb, Ag, Cd, Sn, Cs, Bi), более сложные. Они отражают процессы подкисления вод на фоне сезонной динамики растворенного кислорода. Концентрации элементов третьей группы в р. Селенге, так же как и второй, увеличиваются в направлении от Монголии к Байкалу

(за исключением Co в период весна – осень и Ge зимой), однако значительно повышены зимой, когда водность реки уменьшается и сильно меняются физико-химические условия (Т, O₂, рН). Этому способствуют условия ледостава и возрастание роли процессов деструкции органического вещества по сравнению с фотосинтезом, а также, вероятно, увеличение вклада подземных вод. Понижение концентрации O₂ и рН в воде зимой способствуют мобилизации некоторых элементов из твердых фаз (речные отложения, взвесь, коллоиды). В этот период по сравнению с другими сезонами в наибольшей степени возрастает концентрация Mn в р. Селенге (до 70 раз). Зимой на участке реки ниже Улан-Удэ наблюдается заметное увеличение концентраций Bi, Mn, Co, Cs, Rb, в то время как концентрация Ge, наоборот, резко и значительно падает, что свидетельствует об увеличении доли подземных вод другого химического состава в питании реки, маркируемых также некоторыми другими элементами (В, Na, Ba, К, Cl).

Четвертая группа элементов (V, As, Sb, I, W, Cu) отражает слабый трансграничный перенос со стороны Монголии в летний период. Концентрации этих элементов были повышенными в июле (особенно на верхнем (0–120 км) участке реки) наряду с аномально большой мутностью и высокой температурой воды (до 26 °С). Нельзя утверждать, что трансграничный перенос данных элементов оказывает значительную нагрузку на российскую часть р. Селенги, поскольку их максимальные концентрации ниже соответствующих уровней глобального природного речного фона, а средневзвешенные – сопоставимы.

На основании анализа литературных данных по другим рекам мира установлено, что максимальные и средневзвешенные концентрации большинства следовых элементов в р. Селенге ниже аналогичных показателей глобального природного речного фона. Превышение максимальных концентраций отмечено для Mo, Mn и Ge. Средневзвешенные показатели превышены в 2–5 раз по Zr, Nb, Sr, Ti, U, Y, Zn, Mo и Sn, что связано со сложным геологическим строением бассейна реки и естественными процессами мобилизации элементов.

В основном створе р. Селенги и ее притоках наблюдаются превышения ПДК, установ-

ленных для водоемов рыбохозяйственного назначения по Mo, Mn, Cu, Al, Fe, V. В большинстве случаев (80 %) превышения небольшие (не более 2 ПДК). Зимой в протоках и озерах дельты наблюдаются существенные превышения рыбохозяйственных нормативов по Mn (46–880 ПДК) и Fe (49 ПДК, оз. Берёзовое), что связано с естественными процессами мобилизации этих элементов из донных отложений: дефицит кислорода и преобладание процессов деструкции органического вещества над фотосинтезом в период ледостава способствуют возникновению восстановительных условий, при которых Mn и Fe становятся подвижными. В барьерной зоне оз. Байкал зафиксированы превышения рыбохозяйственных нормативов: по Mo постоянно (1.2–2.1 ПДК), по Cu зимой (до 1.8 ПДК), летом (до 1.9 ПДК) и осенью (до 1.3 ПДК), по V летом (до 1.6 ПДК), по Mn зимой (до 2.2 ПДК).

Российские нормативы для питьевой воды в р. Селенге немного превышены зимой по Mn (ПДК = 100 мкг/л, Россия) в двух случаях – ниже Улан-Удэ (1.2 ПДК) и вблизи п. Мурзино (1.1 ПДК).

Выявленные превышения нормативов в большей степени связаны с естественными процессами мобилизации элементов; антропогенное влияние на р. Селенгу по следовым элементам не обнаруживается.

Работа выполнена при финансовой поддержке Проекта СО РАН VII.62.1.3. “Комплексный экологический аудит Байкальской природной территории и экосистемы озера Байкал – участка мирового природного наследия”.

Авторы выражают благодарность руководству Байкальского института природопользования СО РАН (г. Улан-Удэ), оказавшего поддержку в проведении совместных сезонных экспедиций на р. Селенгу; сотрудников Лимнологического института СО РАН (г. Иркутск) К. Т. Золотареву за подготовку образцов для ИСР-MS-анализа, Н. В. Башенхаеву за определение растворенного органического углерода, И. Н. Лопатину и Н. П. Сезько за определение главных ионов и кремния; сотрудника Института земной коры СО РАН (г. Иркутск) И. С. Чувашова за составление карты-схемы тектоно-стратиграфических террейнов бассейна р. Селенги.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Аниканова М. Н., Батима П., Нямжав П., Дашдэлэг Н. // Мониторинг состояния озера Байкал / Под ред. Ю. А. Израэля, Ю. А. Анохина. JL: Гидрометеиздат, 1991. С. 63–68.
- 2 Тулохонов А. К., Энхцэцэг Б., Шеховцов А. А., Олофинская Н. Е., Хандажапова Л. М. // Байкальская Азия / Под ред. А. К. Тулохонова, Б. Л. Раднева, А. С. Михеевой, Э. Д. Санджеева. Улан-Удэ: Экос, 2009. С. 30–32.
- 3 Дувчигдамба Г., Баханова М. В., Ширапова С. // Материалы 14 Всерос. науч.-техн. конф. “Энергетика: экология, надежность, безопасность”. Томск: Изд-во ТПУ, 2008. С. 137–139.
- 4 Mun Y., Ko, I. H., Janchivdorj L., Gomboev B., Kang S. I., Lee, C.-H. // Integrated Water Management Model on the Selenga River Basin. Status Survey and Investigation (Phase I). Seoul: Tae Joo Park, Korea Environment Institute, 2008. 423 p.
- 5 Синокович В. Н., Сороковикова Л. М., Томберг И. В., Тулохонов А. К. // Докл. РАН. 2010. № 6. С. 817–821.
- 6 Добрецов Н. Л., Тулохонов А. К., Даш Д., Мандах Н., Волошин А. Л. // Байкальская Азия/Под ред. А. К. Тулохонова, Б. Л. Раднева, А. С. Михеевой, Э. Д. Санджеева. Улан-Удэ: Экос, 2009. С. 73–77.
- 7 Байкал. Атлас /Под ред. Г. И. Галазия, В. М. Каргушина, Б. Ф. Лута и др., М.: Федеральная служба геодезии и картографии, 1993. 160 с.
- 8 Степанов Ю. Г., Фёдоров В. Н., Хаустов А. П., Захарченко С. И., Степанова В. В., Батсук Н. // Структура и динамика речного стока горных регионов /Отв. ред. В. И. Верболова, Новосибирск: Наука, 1987. С. 145–153.
- 9 Синокович В. Н. // География и природ. ресурсы 2008. Т. 1. С. 72–75.
- 10 Гидрологический режим рек бассейна р. Селенги и методы его расчета /Под ред. В. А. Семенова, Б. Мягмаржав. JL: Гидрометеиздат, 1977. 235 с.
- 11 Вотинцев К. К., Глазунов И. В., Толмачева А. П. Гидрохимия рек бассейна озера Байкал. М.: Наука, 1965. 495 с.
- 12 Афанасьев А. Н. // Труды Лимнологического института СО АН СССР. Т. 25, Вып. 45. Новосибирск: Наука, 1976. 238 с.
- 13 Kravchinsky V. A., Cogni J.-P., Harbert W. P., Kuzmin M. I. // Geophys. J. Int. 2002. Vol. 48. P. 34–57.
- 14 Ярмолюк В. В., Коваленко В. И. // Геология и геофизика. 2003. Т. 44, № 12. С. 1305–1320.
- 15 Коваленко В. И., Кузьмин М. И., Антипин В. С., Коваль П. В., Цыпук Ю. П. // Основные проблемы геологии Монголии. Совместная Советско-Монгольская научно-исследовательская геологическая экспедиция: Тр. / Под ред. Н. С. Зайцева, А. Л. Яншина. М.: Наука, 1977. Вып. 22. С. 133–143.
- 16 Оролмаа Д., Эрдэнэсайхан Г., Борисенко А. С., Федосеев Г. С., Бабич В. В., Жмодик С. М. // Геология и геофизика. 2008. Т. 49, № 7. С. 706–719.
- 17 Фомин Г. С. Вода. Контроль химический, бактериальный и радиационной безопасности по международным стандартам // Энциклопедический справочник. М.: Протектор, 2000. 840 с.
- 18 Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши: ч. 1 / Под ред. Л. В. Боевой. Ростов-на-Дону: НОК, 2009. 1044 с.
- 19 Барам Г. И., Верещагин А. Л., Голобокова Л. П. // Журн. анал. химии. 1999. Т. 54, № 9. С. 962–965.
- 20 Suturin A. N., Paradina L. E., Epov V. N., Semenov A. R., Lozhkin V. I., Petrov L. L. // Spectrochim. Acta B. 2003. Vol. 58. P. 277–288.
- 21 Aries S., Valladon M., Polve M., Dupre B. // Geostandard Newslett. 2000. Vol. 24, No. 1. P. 19–31.
- 22 Сороковикова Л. М., Синокович В. Н., Голобокова Л. П., Чубаров М. П. // Вод. ресурсы 2000. Т. 27, № 5. С. 560–565.
- 23 Гидрогеология СССР. Т. XXII. Бурятская АССР / Под ред. А. И. Ефимова, М. А. Дорониной. М.: Недра, 1970. 432 с.

- 24 Edgington D. N., Robbins J. A., Colman S. M., Orlandidni K. A., Gustin, M. P., Klump J. V., Granina L. Z. // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1997. Vol. 148. P. 399–404.
- 25 Miller C. A., Peucker-Ehrenbrink B., Walker B. D., Marcantonio F. // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2011. Vol. 75. P. 7146–7179.
- 26 Edgington D. N., Robbins J. A., Colman S. M., Orlandini K. A., Gustin M. P. // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1996. Vol. 142. P. 29–42.
- 27 Falkner K. K., Measures C. I., Herbeilin S. E., Edmond J. M. // *Limnol. Oceanogr.* 1991. Vol. 36, No 3. P. 413–423.
- 28 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. // *Limnol. Oceanogr.* 1997. Vol. 42, No. 2. P. 329–345.
- 29 Гигиенические нормативы ГН 2.1.5.1315-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования: Утв. Гл. гос. сан. врачом РФ 27.04.03. Введ. 15.06.03.
- 30 Вода. Санитарные правила, нормы и методы безопасного водопользования населения: Сб. документов. 2-е изд., перераб. и доп. / Составители Ю. А. Рахманин, З. И. Жолдакова, Г. Н. Красовский. М.: ИнтерСЭН, 2004. 768 с.
- 31 Guidelines for Brinking-Water Quality. 4th Ed. / World Health Organization, ISBN 978 92 4 154815 1, 2011, 564 p. URL: http://whqlibdoc.who.int/publications/2011/9789241548151_eng.pdf
- 32 Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения: Приказ Федерального агентства по рыболовству от 18.01.10 № 20. Зарегистр. в М-ве юстиции РФ 09.02.10. Пер. № 16326.
- 33 Pokrovsky O. S., Schott J., Dupre B. // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2006. Vol. 70. P. 3239–3260.
- 34 Bagard M. L., Chabaux F., Pokrovsky O. S., Viers J., Prokushkin A. S., Stille P., Rihs S., Schmitt A. D., Dupre B. // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2011. Vol. 75. P. 3335–3357.
- 35 Pokrovsky O. S., Schott J., Kudryavtzev D. I., Dupre B. // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2005. Vol. 69. P. 5659–5680.
- 36 Bjorkvald L., Buffam I., Laudon H., Morth C. M. // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2008. Vol. 72. P. 2789–2804.
- 37 Gaillardet J., Viers J., Dupre B. *Treatise on Geochemistry*, vol. 5 / Eds. H. M. Holland and K. K. Turekian. Oxford: Elsevier–Pergamon, 2003. P. 225–272.
- 38 Peters A., Simpson P., Merrington G., Rothenbacher K., Sturdy L. // *Bull Environ. Contam. Toxicol.* 2011. Vol. 86. P. 637–641.
- 39 Nielsen S. G., Rehkamper M., Porcelli D., Andersson P., Halliday A. N., Swarzenski P. W., Latkoczy C., Gunther D. // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2005. Vol. 19, No. 8. P. 2007–2019.
- 40 Martin J. M., Meybeck M. // *Mar. Chem.* 1979. Vol. 7. P. 173–206.
- 41 Tagami K., Uchida S. // *Chemosphere.* 2006. Vol. 65. P. 2358–2365.
- 42 Moran J. E., Oktay S. D., Santschi P. H. // *Water Resour. Res.* 2002. Vol. 38, No. 8. P. 24–1–24–10.
- 43 Чудаева В. А., Шестеркин В. П., Чудаев О. В. // *Вод. ресурсы.* 2011. Т. 38, № 5. С. 606–617.
- 44 Byrd J. T., Andreae M. O. // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1986. Vol. 50. P. 835–845.
- 45 Geochemical Atlas of Europe. Part 1/Eds. R. Salminen M. J. Batista, M. Bidovec, A. Demetriades et al. Espoo: Geological Survey of Finland, Otamedia Oy, 2005. 525 p. URL: <http://weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/>
- 46 Zhou J., Ma D., Pan J., Nie W., Wu K. // *Environ. Geol.* 2008. Vol. 54. P. 373–380.
- 47 Reimann C., Bjorvatn K., Frengstad B., Melaku Z., Tekle-Haimanot R., Siewers U. // *Sci. Total Environ.* 2003. Vol. 311. P. 65–80.
- 48 Reimann C., Finne T. E., Nordgulen O., Sather O. M., Arnoldussen A., Banks D. // *Appl. Geochem.* 2009. Vol. 24. P. 1862–1874.