

Гидрохимический баланс системы озер Иткуль – Ши́ра (Хакасия, Российская Федерация)

Н. В. ГУСЕВА, О. Г. САВИЧЕВ

Томский политехнический университет
634050, Томск, просп. Ленина, 30
E-mail: Guseva24@yandex.ru

Статья поступила 07.12.15

Принята к печати 10.02.16

АННОТАЦИЯ

Выполнен расчет водного и гидрохимического баланса озер Ши́ра и Иткуль, расположенных в аридной зоне в Республике Хакасия (Российская Федерация). Показано, что оз. Иткуль может рассматриваться как сточное, что в значительной степени и определяет основные отличия гидрохимического баланса двух водоемов. Отток воды из него в оз. Ши́ра в среднем ориентировочно оценивается в размере 6791 тыс. м³/год, а отток растворенных солей – 35 697 т/год. Озеро Ши́ра может рассматриваться как бессточный водоем с испарительным механизмом формирования химического состава его вод, а оз. Иткуль – как проточный водоем. Вследствие меньшей значимости испарения в формировании химического состава вод и меньшем времени их взаимодействия в системе вода – порода в оз. Иткуль не происходит такого концентрирования солей, как в оз. Ши́ра. Сделано предположение, что для аридной зоны Северной и Центральной Азии это является не исключением, а закономерностью.

Ключевые слова: оз. Ши́ра, оз. Иткуль, Хакасия, степная зона, гидрохимический и водный баланс, взаимодействие воды с горными породами, аридные экосистемы.

Раскрытие механизмов формирования химического состава озерных вод в аридной зоне представляет собой сложную задачу, решение которой имеет важное значение для развития геохимии и геоэкологии. Своеобразие этой задачи можно проиллюстрировать на примере озер Хакасии. Они расположены на относительно небольшом расстоянии друг от друга (до 4–5 км), но минерализация и химический состав их вод может различаться радикально – от пресных, гидрокарбонатных кальциевых до рассолов сульфатно-хлоридного магниевно-натриевого состава. Некоторые из этих озер давно изучаются и исполь-

зуются для бальнеологических и рекреационных целей [Природные воды..., 2003; Banks et al., 2004; Гусева и др., 2012], однако детальных морфометрических и гидрологических исследований этих озер до сих пор не проведено.

С учетом этого в Томском политехническом университете в течение ряда лет выполнялись комплексные исследования озер Ши́ра и Иткуль (в ряде источников – Иткуль), расположенных в степной зоне в 3–4 км друг от друга (рис. 1, 2) [Природные воды..., 2003; Гусева и др., 2012; Guseva, Kopylova, 2013]. Суммарное содержание раство-

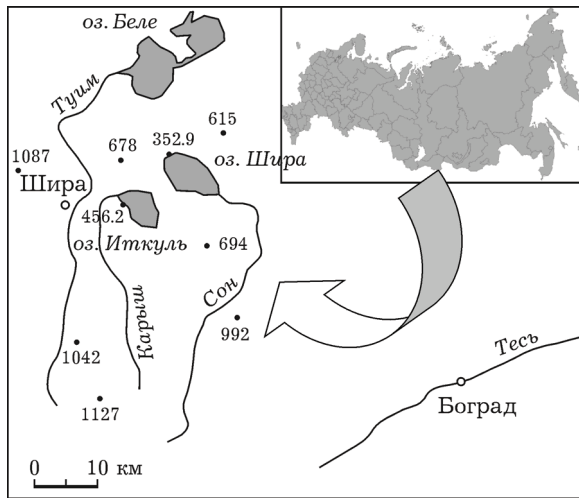


Рис. 1. Схема расположения озер Ши́ра и Иткуль и высотные отметки водосборной поверхности (значения среднего уреза воды в озерах: Ши́ра – 352,2 м; Иткуль – 456,2 м)

ренных солей в водах первого озера (Ши́ра) составляет 12–31 г/кг, а в водах второго (Иткуль) – всего 0,6–0,7 г/кг, при этом морфометрические характеристики этих озер сопоставимы. В частности, средняя глубина оз. Ши́ра – 11 м (максимум – 24 м), а оз. Иткуль – 9,1 м (максимум 17 м). Площадь акватории оз. Ши́ра – 35,90 км², оз. Иткуль – 23,25 км². В оз. Ши́ра впадает р. Сон, сток из водоема не выявлен. В оз. Иткуль впадает р. Карыш, малые водотоки Карасук и Шел-Сух, а в многоводный период возможен сток по руслу пересыхающего ручья Тушинский

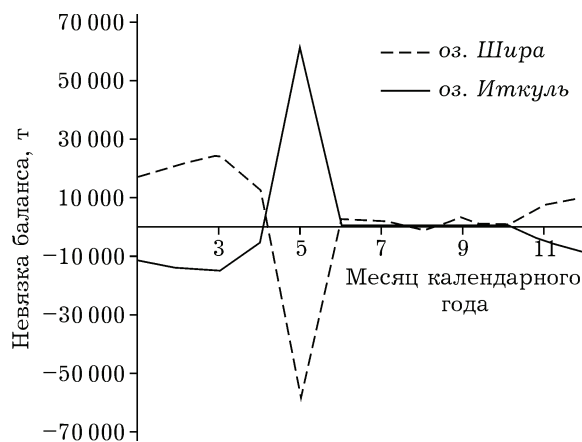


Рис. 2. Внутригодовое распределение невязки гидрохимического баланса озер Ши́ра и Иткуль (погрешность расчета, согласно [Водное хозяйство..., 1988], около 20 %)

в р. Туим (через оз. Орлово). Высотная отметка среднемноголетнего уреза воды в оз. Ши́ра – 352,9 м (в Балтийской системе высот), в оз. Иткуль – 456,2 м. Более подробная характеристика природных условий и водного баланса рассматриваемых озер приведена в литературе [Природные воды..., 2003; Природный комплекс..., 2010, 2011].

Ранее авторами, совместно с Б. Д. Абдуллаевым, выполнен расчет водного баланса этих озер [Савичев и др., 2015]. В результате сделан вывод о том, что, во-первых, озера гидравлически связаны. Во-вторых, оз. Иткуль может рассматриваться как сточное, а отток воды из него направлен в оз. Ши́ра в размере 5433–8149 тыс. м³/год (в среднем 6791 тыс. м³/год). В-третьих, только оз. Ши́ра может рассматриваться как бессточный водоем с испарительным механизмом формирования химического состава его вод, а оз. Иткуль характеризуется более интенсивным водообменом, сглаживающим эффект концентрирования солей в озерных водах в процессе испарения воды с акватории в июне – июле [Савичев и др., 2015]. Следующим этапом исследований и целью этой работы является расчет и анализ гидрохимического баланса озер Ши́ра и Иткуль для обоснования механизмов формирования их химического состава.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследование включало в себя разработку и анализ среднемноголетнего (за последние 50 лет) гидрохимического баланса, а также отбор проб озерных вод, определение их химического состава и проведение термодинамических расчетов для уточнения и подтверждения выводов, полученных при анализе водного и гидрохимического баланса системы озер Ши́ра – Иткуль.

Математическая модель водного баланса какой-либо территории в общих чертах имеет вид (1), а модель гидрохимического баланса – вид (2, 3):

$$X_t + Z_t - E_t - Y_t \pm \Delta U_t + A_{1,t} - A_{2,t} \pm I_t = \eta_W, \quad (1)$$

$$M_{X,t} + M_{Z,t} - M_{E,t} - M_{Y,t} \pm M_{U,t} + M_{A_{1,t}} - M_{A_{2,t}} \pm M_{I,t} \pm R = \eta_G, \quad (2)$$

или

$$\begin{aligned}
& V_{X,t}C_{X,t} + V_{Z,t}C_{Z,t} - V_{E,t}C_{E,t} - V_{Y,t}C_{Y,t} \pm \\
& \pm V_{U,t}C_{U,t} + V_{A1,t}C_{A1,t} - V_{A2,t}C_{A2,t} \pm \\
& \pm V_{I,t}C_{I,t} \pm R = \eta_G, \quad (3)
\end{aligned}$$

где Y_t и $V_{Y,t}$ – слой и объем суммарного водного стока (поверхностного $Y_{s,t}$ и подземного $Y_{g,t}$) за период времени t (за месяц Y_m или год Y_y) с рассматриваемой территории (водного объекта); X_t и $V_{X,t}$ – слой и объем атмосферного увлажнения; Z_t и $V_{Z,t}$ – слой и объем водопритока из прилегающих водосборных территорий; E_t и $V_{E,t}$ – слой и объем испарения с поверхности водосбора (E_W) или озера (E_L) с учетом конденсации влаги (за месяц E_m или год E_y); ΔU_t и $V_{U,t}$ – изменение слоя и объема влагозапасов в водосборе (ΔU_W) или озере (ΔU_L) за месяц (ΔU_m) или год (ΔU_y); $A_{1,t}$, $V_{A1,t}$ и $A_{2,t}$, $V_{A2,t}$ – слой и объем сброса сточных вод и забора воды; I_t и $V_{I,t}$ – слой и объем потерь воды на льдообразование (или приток воды, образующейся при таянии льда в весенний период; для месяцев с положительными среднемесячными температурами воздуха и в целом для года $I_t = 0$); $C_{Y,t}$, $C_{X,t}$, $C_{Z,t}$, $C_{E,t}$, $C_{U,t}$, $C_{A1,t}$, $C_{A2,t}$, $C_{I,t}$ – концентрация вещества в стоке с рассматриваемой территории, атмосферных осадках, притоке с прилегающих территорий, испаряющейся влаге, влагозапасах в водосборе или озере, сточных водах, забираемой воде, в замерзающей или талой воде; $M_{Y,t}$, $M_{X,t}$, $M_{Z,t}$, $M_{E,t}$, $M_{U,t}$, $M_{A1,t}$, $M_{A2,t}$, $M_{I,t}$ – масса вещества в стоке с рассматриваемой территории, атмосферных осадках, притоке с прилегающих территорий, испаряющейся влаге, в запасах влаги в водосборе или озере, сточных водах, забираемой воде, в замерзающей или талой воде; R – изменение количества вещества за счет физико-химических, химических и биохимических процессов; η_W и η_G – невязка водного и гидрохимического балансов; в целом нижний индекс X соответствует атмосферному увлажнению, Y – водному стоку, E – испарению, A – антропогенному воздействию, Z – поступлению с прилегающих территорий, I – ледовым образованиям [Алекин, 1970; Loucks, Van Beek, 2005].

При расчете водного баланса [Савичев и др., 2015] использованы следующие способы оценки элементов водного баланса и допущения по их применению: 1) в среднемноголет-

нем разрезе ориентировочно принято, что в годовом разрезе изменение влагозапасов $\Delta U_y \approx 0$; 2) величина I_t в первом приближении может быть рассчитана в зависимости от суммы отрицательных температур атмосферного воздуха по формуле Ф. И. Быдина [Савичев и др., 2015]; 3) месячное “эффективное” атмосферное увлажнение определяется как сумма жидких осадков и водоотдачи из сезонного снежного покрова [Савичев и др., 2015]; водоотдача из снежного покрова определяется методом температурных коэффициентов в зависимости от температуры атмосферного воздуха с ограничением по влагозапасам в снежном покрове, сформировавшемся при отрицательных температурах воздуха [Гельфан, 2007]; 4) месячное испарение с поверхности водосбора при отсутствии снежного покрова определяется по методу М. И. Будыко в интерпретации [Методические рекомендации..., 1986]; расчет влагозапасов почвы проводится с первого месяца, в течение которого в среднем наблюдаются талые грунты или происходит их интенсивное оттаивание (в рассматриваемом случае – с апреля); испарение с поверхности снежного покрова вычисляется по формуле П. П. Кузьмина [Ресурсы... 1972]; 5) испарение с водной поверхности определялось согласно общепринятым методикам [Методика..., 2007]; 6) слой месячной подземной составляющей речного стока $Y_{g,m}$ определялся интерполяцией между значениями стока в феврале и декабре; с декабря по март подземный сток принимается равным речному; для территорий за пределами водосборов рек Сон или Карыш подземный сток в первом приближении определяется как произведение соответствующей площади на модуль подземного стока, полученный для соответствующих рек; 7) изменение воды в озере $\Delta U_{L,m}$ при наличии данных об уровнях воды (в случае оз. Ши́ра) определяется по формуле усеченной пирамиды, согласно Б. Б. Богословскому [1960].

Более подробное описание математической модели водосбора и алгоритм моделирования приведены в работе О. Г. Савичева [2012], а результаты расчета водного баланса озер Ши́ра и Иткуль – в статье О. Г. Савичева с соавт. [2015]. В качестве исходной

информации использованы данные о среднемесячных значениях температуры воздуха, упругости водяного пара, дефиците влажности, скорости ветра, месячных суммах атмосферных осадков, полученные на метеостанции Ши́ра в нескольких километрах от исследуемых озер [Природный комплекс..., 2010, 2011; СНИП 23-01-99*; Ресурсы..., 1973]. Влагозапасы в метровом слое почвы на начало апреля (152,3 мм) и температурный коэффициент для расчета снеготаяния (0,43 мм/(сут · °С)) определены подбором. Среднемесячные значения расходов воды р. Сон вычислены по данным наблюдений на этом водотоке у пос. Спи́ринская Заимка за 1967–1985 гг. с учетом полной площади водосбора. Водный сток р. Ка́рыш вычислен умножением площади водосбора этой реки на модуль водного стока, рассчитанный для геометрического центра водосбора как среднее взвешенное между значениями модулей водного стока р. Сон у пос. Спи́ринская Заимка и р. Туим у пос. Туим. Забор воды из оз. Иткуль принят в размере 135 тыс. м³/мес [Природный комплекс..., 2010], а сброс сточных вод в оз. Ши́ра – ориентировочно равным забору воды из оз. Иткуль [Савичев и др., 2015] (с учетом взаимной компенсации забора воды из подземных источников и инфильтрации сточных вод).

Гидрохимический баланс рассчитан для суммы главных ионов Σ_{mi} (суммы концентраций Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , Cl^-). Исходными материалами послужили опубликованные данные гидрохимических наблюдений Росгидромета [Ресурсы..., 1973], фондовые и опубликованные данные Томского политехнического и Томского государственного университетов [Природный комплекс... 2010, 2011; Гусева и др., 2012].

Средние значения Σ_{mi} приняты по опубликованным и фондовым материалам Томского политехнического университета, Томского государственного университета, Росгидромета и ряда других организаций [Природные воды..., 2003; Природный комплекс..., 2010, 2011; Гусева и др., 2012; Ресурсы..., 1973; Rogozin et al., 2010]: для р. Сон – 605,4 мг/дм³; для р. Ка́рыш – 401,5 мг/дм³; для воды, образующейся при таянии льда на оз. Ши́ра, – 7,2 г/дм³. Среднее по вертикали значение Σ_{mi} для оз. Ши́ра (как результат

линейной интерполяции между измерениями в слое 0,5 и 20–21 м от поверхности для средней глубины 11 м) рассчитывается по регрессионной зависимости: $C_i = 0,33C_{i,0,5} + 13\,947,30$, где C_i и $C_{i,0,5}$ – среднемесячная концентрация вещества в среднем по вертикали и в слое 0,5 м от поверхности; квадрат корреляционного отношения $R^2 = 0,55$ при критическом отношении $R_k^2 = 0,36$.

Оценка внутригодового распределения суммы главных ионов в речных водах выполнена по регрессионной зависимости, полученной для степной зоны Западной Сибири: $C_i/C_b = 0,81(Q_i/Q_b)^{-0,152}$, где C_i и C_b – среднемесячная и средняя многолетняя концентрации вещества, Q_i и Q_b – среднемесячный и средний многолетний расходы воды, $R^2 = 0,55$; характеристика исходных данных приведена в работе О. Г. Савичева [2014]. В подземном водопитоке величина Σ_{mi} для каждого месяца рассчитывается по той же зависимости, но уже для расхода подземных вод. Значения Σ_{mi} вод, образующихся при таянии льда в озере Иткуль приняты равными сумме главных ионов в водах этого водоема.

Сумма главных ионов в атмосферных осадках (и в испаряющейся влаге) определена по данным [Савичев, Иванов, 2010], полученным для снега и дождя (выбор того или иного значения при расчете гидрохимического баланса исследуемых озер выполняется в зависимости от отрицательной или положительной температуры атмосферного воздуха). Содержание растворенных солей в хозяйственно-бытовых сточных водах, сбрасываемых в оз. Ши́ра, принято равным соответствующему показателю для вод оз. Иткуль в предположении, что сточные воды нормативно очищены и соответствуют по составу водам источника.

В августе 2015 г. дополнительно отобрано пять проб озерных вод из слоя 0,3–0,5 м от поверхности в 3 м от берега. Химический состав озерных вод определялся в аккредитованной Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Томского политехнического университета следующими методами: рН – потенциометрический; удельная электропроводность – кондуктометрический; плотность раствора – ареометрический; Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , Cl^- – титриметрический;

Si – фотометрический; SO_4^{2-} , Na^+ , K^+ – ионная хроматография; Al – атомно-абсорбция; растворенный органический углерод $\text{C}_{\text{орг}}$ – высокотемпературное каталитическое окисление.

Термодинамические расчеты с целью определения индекса насыщения L (4) вод вторичными минералами и соединениями выполнены с использованием программного комплекса Solution+, разработанного на основе метода констант и расчета коэффициентов активности по уравнению Дэвиса [Савичев и др., 2003]:

$$L = \lg \text{ПА} - \lg K_{\text{nost}}, \quad (4)$$

где ПА – произведение активностей группы веществ; K_{nost} – константа неустойчивости. Отрицательные значения индекса L указывают на потенциальное недосыщение, а положительные – на пересыщение раствора относительно минералов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Выполненные расчеты позволили получить общую картину формирования гидрохимического баланса озер Иткуль и Ши́ра, в целом совпадающую с ранее полученными результатами анализа водного баланса [Савичев и др., 2015]. Основными особенностями гидрохимического баланса исследуемых водоемов являются следующие.

В среднем за многолетний период в водосборе р. Сон и оз. Ши́ра в весенне-летний период происходит накопление влагозапасов, а в осенний и зимний – их сработка, причем наибольшее среднеемесячное испарение с поверхности водосбора приурочено к августу (77 мм/мес), а испарение с водной поверхности – к июню (132 мм/мес.) и июлю (131 мм/мес.). Соответственно, на период апрель – октябрь приходится и поступление солей за счет выпадения жидких атмосферных осадков и концентрирование солей при испарении воды, на период март – май – за счет таяния снега на водосборе (см. табл. 1, 2).

Водоприток в оз. Иткуль расходуется не только на испарение и насыщение придонной и береговой зон, но и на сток из озера по ручью Тушинскому и в направлении к оз. Ши́ра. Последнее предположение основывается на том, что, во-первых, указанный

водоем (оз. Ши́ра) расположен в 3–5 км от оз. Иткуль, а уровни в первом водоеме примерно на 100 м ниже, чем во втором. Во-вторых, подземный переток из оз. Иткуль в оз. Ши́ра хорошо согласуется с результатами расчета водного и гидрохимического балансов двух водоемов и обеспечивает выравнивание дисбаланса влаги.

Если допустить, что водообмен с ложем и берегами коррелирует с изменением влагозапасов в водосборе ΔU_i и в целом за год стремится к нулю, то значение невязки годового водного баланса может быть интерпретировано как характеристика фильтрационного потока воды из озера Иткуль в оз. Ши́ра (см. табл. 1, 2). По полученным данным его объем составляет 6791 тыс. $\text{м}^3/\text{год}$ или примерно $0,22 \text{ м}^3/\text{с}$, что сопоставимо со среднееголетними расходами воды рек Туим у пос. Туим и Тесь у пос. Боград (по $0,23 \text{ м}^3/\text{с}$) и р. Сон у пос. Спиринская Заимка ($0,31 \text{ м}^3/\text{с}$). С учетом погрешности расчетного определения (около 20 % [Мелиорация..., 1988] или $1358 \text{ тыс. м}^3/\text{год}$) годовой сток воды из оз. Иткуль в оз. Ши́ра в среднем за многолетний период ориентировочно оценивается в диапазоне от 5433 до 8149 тыс. $\text{м}^3/\text{год}$ (расход воды – от $0,17$ до $0,26 \text{ м}^3/\text{с}$). Ши́рина потока из оз. Иткуль в оз. Ши́ра составляет примерно 6 км, средняя мощность водоносных отложений – 75 м, а уклон поверхности (предположительно – и водной) – $0,00295 \text{ (м/м)}$. Исходя из этого, можно приближенно оценить среднюю скорость движения подземных вод в размере $0,041 \text{ м/сут}$, а коэффициент фильтрации – $1,391 \text{ м/сут}$ [Савичев и др., 2015].

Если, согласно [Михайлов и др., 2005], использовать в качестве характеристики водообмена отношение (5), то для приведенных выше средних значений глубины и площади акваторий можно оценить коэффициенты условного водообмена для озер Ши́ра и Иткуль в размере $0,05$ и $0,10$ соответственно. Следовательно, интенсивность водообмена в оз. Иткуль примерно в два раза выше, чем в оз. Ши́ра.

$$K_w = (V_E + V_Y + V_{A2})/V_L, \quad (5)$$

где K_w – коэффициент условного водообмена; V_L – объем озера, полученный умножением средних значений площади акватории

Т а б л и ц а 1
Среднемесячный водный и гидрохимический баланс оз. Шира

Месяц	Атмосферные осадки на поверхность озера			Испарение с водной поверхности		Суммарный водоприток р. Сон		Подземный вынос кроме р. Сон и оз. Иткуль		Сброс сточных вод		Потери воды на льдообразование		Водоприток из оз. Иткуль или взаимодействие с геологической средой	
	V_X	M_X	V_E	M_E	$V_{Z(C)}$	$M_{Z(C)}$	V_{Zg}	M_{Zg}	V_{A1}	M_{A1}	V_I	M_I	$V_{Zg(И)}$	$M_{Zg(И)}$	
I	200	5	0	0	169	109	109	70	0	0	23 708	170 700	22 878	17 284	
II	100	2	0	0	117	78	75	51	0	0	28 065	202 066	28 125	21 670	
III	0	0	0	0	320	187	93	61	0	0	30 072	216 520	30 895	24 233	
IV	1272	65	1791	91	1660	752	99	64	0	0	11 670	84 023	14 776	11 780	
V	1109	56	3579	182	1441	670	111	71	0	0	-12 1608	-875 580	-11 8351	-59 285	
VI	1784	91	4755	242	1396	649	116	74	135	77	0	0	3884	2215	
VII	2771	141	4696	239	1863	833	129	81	140	86	0	0	2093	1288	
VIII	1957	100	3560	181	1637	747	138	86	140	91	0	0	-2181	-1416	
IX	955	49	1968	100	1306	613	143	88	0	0	0	0	2788	1887	
X	632	32	845	43	1157	556	157	96	0	0	0	0	-1257	-880	
XI	0	0	0	0	535	288	161	97	0	0	10 219	73 577	9810	7071	
XII	200	5	0	0	271	162	175	105	0	0	17 874	128 694	13 330	9851	
I-XII	10982	545	21194	1079	11871	5644	1506	944	414	253	0	0	6791	35 697	

Примечание. V – объем воды (V, тыс. м³); M – масса растворенных солей (M, т); в случае испарения M – масса растворенных солей, поступающая в водоем при испарении воды с минерализацией, равной минерализации атмосферных осадков; объем водопритока из оз. Иткуль принят в размере невязки водного баланса; расчет водного баланса выполнен авторами в работе [Савичев и др., 2015].

Среднемесячный водный и гидрохимический баланс оз. Иткуль

Месяц	Атмосферные осадки на поверхность озера		Испарение с поверхности		Суммарный водоприток р. Карыш		Подземный приток с водосбора (кроме р. Карыш)		Забор воды		Потери воды на льдообразование		Отток в оз. Шира или взаимодействие с геологической средой	
	V_X	M_X	V_E	M_E	$V_{Z(C)}$	$M_{Z(C)}$	V_{Zg}	M_{Zg}	V_{A1}	M_{A1}	V_I	M_I	$V_{Zg(II)}$	$M_{Zg(II)}$
I	130	7	0	0	442	158	369	132	0	0	15 556	11 752	22 878	17 284
II	65	3	0	0	370	134	309	112	0	0	18 347	14 136	28 125	21 670
III	0	0	0	0	477	168	346	125	0	0	19 636	15 401	30 895	24 233
IV	824	42	1160	59	1215	370	338	122	0	0	7718	6153	14 776	11 780
V	718	37	2318	118	1056	330	352	127	0	0	-80 174	-61 294	-118 351	-59 285
VI	1156	59	3079	157	877	280	344	123	135	77	0	0	3884	2215
VII	1795	91	3041	155	1182	363	359	129	140	86	0	0	2093	1288
VIII	1267	64	2306	117	1076	335	362	130	140	91	0	0	-2181	-1416
IX	618	31	1275	65	963	304	354	126	0	0	0	0	2788	18 87
X	409	21	547	28	906	290	369	132	0	0	0	0	-1257	-880
XI	0	0	0	0	566	194	360	128	0	0	7075	5099	9810	7071
XII	130	7	0	0	449	160	376	134	0	0	11 843	8752	13 330	9851
I-XII	7112	362	13726	699	9580	3085	4239	1518	414	253	0	0	6791	35 697

Примечание. Отток воды из оз. Иткуль принят равным невязке водного баланса оз. Шира, а изменение объема озерных вод вычислено по уравнению (1); изменение объема воды в оз. Иткуль предположительно содержит систематическую ошибку вследствие неучета стока в р. Тулим и оз. Березовое; расчет водного баланса выполнен авторами в работе [Савичев и др., 2015].

и (средней) глубины; прочие обозначения – те же, что и для уравнения (2, 3).

Гидрохимический сток из оз. Иткуль в оз. Ши́ра составляет в среднем 35 698 т/год, что существенно превышает поступление из всех прочих источников главных ионов в оз. Ши́ра (см. табл. 1). Значения основных элементов гидрохимического баланса оз. Ши́ра следующие, т/год: поступление с атмосферными осадками – 545; отток с испаряющейся влагой – 1079; приток с водами р. Сон – 5644; подземный приток (помимо притока по русловой сети и из оз. Иткуль) – 944; сброс хозяйственно-бытовых стоков – 253; фильтрационный поток из оз. Иткуль – 35 697; невязка баланса – 41 498.

Невязка гидрохимического баланса для оз. Ши́ра предположительно объясняется не только погрешностями определения приходных и расходных составляющих, но и удалением химических элементов из водной среды с малорастворимыми соединениями, образующимися при взаимодействии с растворенным органическим веществом, взвешенными наносами, а также в результате процессов вторичного минералообразования. Возможно, определенную роль играют и процессы концентрирования и разбавления при образовании и таянии ледяного покрова.

Для подтверждения этой гипотезы авторами в августе 2015 г. выполнен отбор и анализ проб воды из озер Ши́ра и Иткуль (табл. 3), а также расчет индексов насыщения озерных вод минералами горных пород.

Воды оз. Иткуль пресные, слабощелочные, гидрокарбонатные натриево-магниевые. Концентрация растворенного органического углерода составляет 9,6 мг/дм³. Концентрация кремния невысока и составляет 3,7 мг/дм³.

Воды оз. Ши́ра также слабощелочные, но характеризуются более высокой минерализацией – 22 400 мг/дм³. В ионном составе преобладают сульфат-ион и натрий, в меньшей степени магний. В водах оз. Ши́ра отмечаются более высокие концентрации породообразующих элементов кремния, железа и алюминия (см. табл. 3). Концентрация растворенного органического углерода – 23,9 мг/дм³.

Согласно оценке степени насыщенности минералами горных пород воды рассматриваемых озер насыщены глинистыми минералами и карбонатами кальция и магния, при

Т а б л и ц а 3

Физико-химические и гидрохимические показатели вод озер Иткуль, Ши́ра по состоянию на 03.08.2015 г., мг/дм³

Компонент	Озеро (отбор пробы из слоя 0,5 м от поверхности)	
	Иткуль	Ши́ра
pH	8,6	8,8
УЭП, мкС/см	705	22 400
Плотность воды	998	1012
Ca ²⁺	24	60
Mg ²⁺	62	1196
Na ⁺	47	3429
K ⁺	4,9	37,0
HCO ₃ ⁻	293	848
CO ₃ ²⁻	12,2	116
SO ₄ ²⁻	76	7970
Cl ⁻	32	1802
Минерализация	551	15 458
Si	3,70	8,60
Fe	0,05	0,29
Al	0,05	0,91
C _{орг}	9,6	23,9

этом они находятся в состоянии ненасыщения первичными породообразующими минералами – альбитом, анортитом, ортоклазом, а также сульфатными минералами – гипсом и ангидритом (табл. 4), которые являются основными источниками поступления химических элементов в воды. Также в рассматриваемых озерах наблюдается насыщение гуматами кальция и магния. Анализ полученных результатов (см. табл. 4) показал, что при увеличении минерализации воды наблюдается рост насыщенности кальцитом (в отсутствие или при низком содержании CO₂), доломитом, гуматами кальция и магния, кварцем. Таким образом, в рассматриваемых водах существует геохимический барьер для накопления в растворе основных солеобразующих элементов – кальция, магния, гидрокарбонат-иона и карбонат-иона, которые удаляются с формирующейся вторичной минеральной фазой, отложение которой наблюдается непосредственно в озере [Третьяков и др., 2012].

Кроме процессов взаимодействия в системе вода – порода в формировании состава

Индекс насыщенности L озерных вод некоторыми минералами и органоминеральными соединениями

Реакция	Оз. Иткуль	Оз. Шира
$\text{CaCO}_3(\text{кальцит}) = \text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$	-0,13	0,23
$\text{CaCO}_3(\text{кальцит}) + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca}^{2+} + 2 \text{HCO}_3^-$	0,33	0,09
$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2(\text{доломит}) = \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + 2 \text{CO}_3^{2-}$	1,49	2,71
$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2(\text{доломит}) + 2\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} = \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + 4 \text{HCO}_3^-$	2,41	2,43
$\text{MgCO}_3(\text{магнезит}) + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{Mg}^{2+} + 2 \text{HCO}_3^-$	-1,87	-1,61
$\text{Ca}(\text{ГК}) = \text{Ca}^{2+} + \text{ГК}^{2-}$	0,18	0,28
$\text{Mg}(\text{ГК}) = \text{Mg}^{2+} + \text{ГК}^{2-}$	1,62	2,22
$\text{CaSO}_4 = \text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$	-3,10	-1,74
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = \text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}_2\text{O}$	-2,89	-1,53
$\text{SiO}_2(\text{кварц}) + 2\text{H}_2\text{O} = \text{H}_4\text{SiO}_4^0$	-0,23	0,26
$2\text{NaAlSi}_3\text{O}_8(\text{альбит}) + 11\text{H}_2\text{O} + 2\text{CO}_2 =$ $= \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}(\text{каолинит}) + 2\text{Na}^+ + 2 \text{HCO}_3^- + 4 \text{H}_4\text{SiO}_4^0$	-9,38	-4,28
$3\text{KAlSi}_3\text{O}_8(\text{ортоклаз}) + 2\text{H}^+ + 12\text{H}_2\text{O} = \text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}\text{OH}_2(\text{мусковит}) + 2\text{K}^+ + 6 \text{H}_4\text{SiO}_4^0$	-23,48	-18,39
$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8(\text{анортит}) + 2\text{H}^+ + 6\text{H}_2\text{O} = \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}(\text{гипсбит}) + 2\text{H}_4\text{SiO}_4 + \text{Ca}^{2+}$	-4,74	-3,28
$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8(\text{анортит}) + 2\text{H}^+ + \text{H}_2\text{O} = \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}(\text{каолинит}) + \text{Ca}^{2+}$	-18,97	-20,14

вод озер аридных районов значительную роль играют процессы испарительного концентрирования. Так, согласно представленным расчетам, в июне – июле водный и гидрохимический баланс исследуемых озер характеризуется преобладанием испарения с водной поверхности над приходными компонентами, что свидетельствует о существенной роли испарительного механизма формирования химического состава вод озера. Однако среди рассматриваемых озер это справедливо только для оз. Шира. Озеро Иткуль в целом нельзя признать бессточным водоемом вследствие значительного оттока воды и растворенных в ней солей по русловой сети в р. Туим и в виде фильтрационного потока – в оз. Шира. Соответственно, испарение оказывает значительно меньшее влияние на формирование гидрохимического баланса и химического состава вод оз. Иткуль в сравнении с оз. Шира, что и является ключевой причиной различия минерализации двух водоемов.

Также отметим, что в зимние месяцы происходит изъятие значительных объемов воды на льдообразование и дополнительное увеличение концентрации главных ионов в озерных водах, а в апреле и мае, напротив, – относительно резкое снижение концентраций растворенных солей в озерных водах

за счет поступления воды с меньшим содержанием растворенных солей в водоем. Как предположено в работах некоторых авторов [Rogozin et al., 2010; Савичев и др., 2015], в оз. Шира это приводит к поддержанию устойчивой стратификации водных масс вследствие того, что верхние слои менее плотные по сравнению с нижними. Однако для пресного оз. Иткуль эта разница не столь существенна и компенсируется ветровым перемешиванием и внутриозерными течениями.

Таким образом, при обосновании механизмов формирования химического состава вод озер Шира и Иткуль необходимо учитывать, что эти водоемы представляют собой единую гидрохимическую систему, в которой испарительный механизм формирования состава вод характерен преимущественно для оз. Шира, а оз. Иткуль выполняет роль проточного резервуара воды и растворенных в ней солей. Анализ данных опубликованных и фондовых материалов о составе вод ряда других озер в аридной зоне Азии [Гусева и др., 2012; Колпакова, 2014; Шварцев и др., 2014] свидетельствует о том, что это не исключение, а достаточно распространенная ситуация для данного региона. В качестве примера подобных систем озер можно рассматривать оз. Белё, расположенное к северу от рассматриваемых водоемов. Особенностью

этого озера является наличие двух частей, расположенных на разных высотных отметках и соединенных протокой. Поскольку переток между частями оз. Белё осуществляется со значительно большей интенсивностью, чем в системе Иткуль – Ши́ра, то и градиент минерализации в данном случае заметен ниже, но все же вполне заметен.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В аридной зоне Северной Азии примерно в одинаковых физико-географических условиях могут наблюдаться существенные различия в формировании водного баланса крупных озер, связанные с сильной изменчивостью испарения и интенсивности водообмена. Последняя величина (интенсивность водообмена), в свою очередь, определяет различия озерных вод по минерализации и химическому составу, что обусловлено разным временем взаимодействия озерных вод с минералами горных пород.

В рассмотренном случае озера Ши́ра и Иткуль представляют собой гидравлически связанную систему водоемов, последнее выполняет роль сточного водохранилища. За счет этого интенсивность водообмена в нем примерно в два раза выше, чем в оз. Ши́ра. Заметно выше и объем испарения (21,2 млн м³ в оз. Ши́ра и 13,7 млн м³ – в оз. Иткуль). Соответственно, средняя минерализация вод оз. Ши́ра примерно в 28 раз выше, чем в оз. Иткуль. Поскольку при росте минерализации наблюдается изменение соотношения главных ионов [Казанцев, 1998; Шварцев, 1998; Крайнов и др., 2004], то происходит и изменение геохимического типа вод – от гидрокарбонатных натриево-магниевых в оз. Иткуль до сульфатных магниевых-натриевых в оз. Ши́ра.

При этом воды оз. Ши́ра пересыщены карбонатами и гуматами кальция и магния, но остаются ненасыщенными гипсом и первичными алюмосиликатами. Можно предположить, что при дальнейшем снижении интенсивности водообмена (за счет увеличения испарения при уменьшении водопритока) произойдет изменение химического состава вод вплоть до рассолов хлоридного или сульфатно-хлоридного натриевого составов, что, на-

пример, и наблюдается на оз. Тус в Хакасии [Гусева и др., 2012], Дус-Холь в Туве [Kopylova et al., 2014] или озерах Монголии [Колпакова, 2014].

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 14-05-31387 и Госзадания “Наука” № 5.1931.2014/К.

ЛИТЕРАТУРА

- Алекин О. А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 444 с.
- Богословский Б. Б. Озероведение. М.: Изд-во Моск. гос. ун-та, 1960. 335 с.
- Гельфан А. Н. Динамико-стохастическое моделирование формирования талого стока. М.: Наука, 2007. 279 с.
- Гусева Н. В., Копылова Ю. Г., Хвощевская А. А., Сметанина И. В. Химический состав соленых озер Северо-Минусинской котловины, Хакасия // Изв. Том. политех. ун-та. 2012. Т. 321, № 1. С. 163–168.
- Казанцев В. А. Проблемы педалогенеза на примере Барабинской равнины. Новосибирск: Наука, 1998. 280 с.
- Колпакова М. Н. Геохимия соленых озер Западной Монголии: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Томск, 2014. 21 с.
- Крайнов С. Р., Рыженко Б. Н., Шве́ц В. М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. М.: Наука, 2004. 677 с.
- Мелиорация и водное хозяйство / под ред. И. И. Бородавченко. М.: Агропромиздат, 1988. Т. 5: Водное хозяйство. 399 с.
- Методика расчета водохозяйственного баланса водных объектов. Утв. Приказом МПР России от 30.11.07 г. № 317. М.: МПР России, 2007. 41 с.
- Методические рекомендации по учету влияния хозяйственной деятельности на сток малых рек при гидрологических расчетах для водохозяйственного проектирования / под ред. Е. Э. Булаховской. Л.: Госкомгидромет, 1986. 168 с.
- Михайлов В. Н., Добровольский А. Д., Добролюбов С. А. Гидрология. М.: Высш. шк., 2005. 463 с.
- Природные воды Ширинского района республики Хакасия / под ред. В. П. Парначева. Томск: Изд-во Том. гос. ун-та, 2003. 183 с.
- Природный комплекс и биоразнообразие участка “Озеро Иткуль” заповедника “Хакасский” / под ред. В. В. Непомнящего. Абакан: Хакас. кн. изд-во, 2010. 418 с.
- Природный комплекс и биоразнообразие участка “Озеро Ши́ра” заповедника “Хакасский” / под ред. В. В. Непомнящего. Абакан: Хакас. кн. изд-во, 2011. 420 с.
- Ресурсы поверхностных вод СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1972. Т. 15: Алтай и Западная Сибирь. Вып. 2: Средняя Обь. 408 с.
- Ресурсы поверхностных вод СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1973. Т. 16: Ангаро-Енисейский район. Вып. 1: Енисей. 723 с.
- Савичев О. Г. Математическое моделирование формирования водного стока рек Западной Сибири // Инженерные изыскания. 2012. № 8. С. 40–48.
- Савичев О. Г. Региональные особенности химического состава речных вод Сибири и их учет при нормиро-

- вании сбросов сточных вод // Вода: химия и экология. 2014. Т. 66, № 1. С. 41–46.
- Савичев О. Г., Гусева Н. В., Абдуллаев Б. Д. Водный баланс системы озер Шира – Иткуль (Хакасия) // Вестн. Том. гос. ун-та. 2015. № 391. С. 214–219.
- Савичев О. Г., Иванов А. О. Атмосферные выпадения в бассейне Средней Оби и их влияние на гидрохимический сток рек // Изв. РАН. Сер. географическая. 2010. № 1. С. 63–70.
- Савичев О. Г., Колоколова О. В., Жуковская Е. А. Состав и равновесие донных отложений р. Томь с речными водами // Геоэкология. 2003. № 2. С. 108–119.
- СНиП 23-01-99*. Строительная климатология. М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 2003. 162 с.
- Третьяков Г. А., Калугин И. А., Дарьин А. В., Рогозин Д. Ю., Дегерменджи А. Г. Физико-химические условия сезонного осаждения карбонатов в озере Шира (Хакасия) // Докл. АН. 2012. Т. 446, № 2. С. 197–200.
- Шварцев С. Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. М.: Недра, 1998. 366 с.
- Шварцев С. Л., Колпакова М. Н., Исупров В. П., Владимиров А. Г., Ариеунбилэг С. Геохимия и формирование состава соленых озер Западной Монголии // Геохимия. 2014. № 5. С. 432–449.
- Banks D., Parnachev V. P., Frengstad B., Holden W., Karnachuk O. V., Vedernikov A. A. The evolution of alkaline, saline ground – and surface waters in the southern Siberian steppes // Appl. Geochem. 2004. Vol. 19, N 12. P. 1905–1926.
- Guseva N., Kopylova Y. Geochemical mobility of chemical elements in saline lake systems in Khakassia (Russia) // Procedia Earth and Planetary Sci. 2013. Vol. 7. P. 325–329.
- Kopylova Y., Guseva N., Oydup Ch., Shestakova A. Chemical composition of some saline lakes in the Tuva region (Russia) // Acta Geologica Sinica. 2014. Vol. 88. Supp 1. P. 82–83.
- Loucks D. P., Van Beek E. Water resources systems planning and management. An Introduction to Methods, Models and Applications. Turin: UNESCO Publishing, printed by Ages Arti Grafiche, 2005. 679 p.
- Rogozin D. Y., Genova S. V., Gulati R. D., Degermendzhy A. G. Some generalizations on stratification and vertical mixing in meromictic Lake Shira, Russia, in the period 2002–2009 // Aquat. Ecol. 2010. Vol. 44, N 3. P. 485–496.

Hydrochemical Balance of Itkul – Shira Lake System (Khakasia, Russian Federation)

N. V. GUSEVA, O. G. SAVICHEV

*Tomsk Polytechnic University
634050, Tomsk, Lenin ave., 30
E-mail: guseva24@yandex.ru*

The water and hydrochemical balance of Shira and Itkul lakes located in the arid (steppe) zone in the Khakasia Republic (Russian Federation) has been calculated. Existence of hydraulic connection of these lakes is shown. Lake Itkul can be considered as flowing reservoir. Outflow of water from Itkul to Shira is 6791 thousand m³/year, and outflow of the dissolved salts is 35 697 tonn/year. In this case, Lake Shira can be only considered as unflowing reservoir with transpiration mechanism of water chemical composition formation. Lake Itkul appears to be a flowing reservoir. In Itkul salt concentration is not such as occurs in Lake Shira because of less influence of evaporation and time of water-rock interaction. This mechanism may be similar for other arid zones in Northern and Central Asia.

Key words: Lake Shira, Lake Itkul, Khakasia, steppe zone, hydrochemical and water balance.