

ВОДНЫЙ БАЛАНС СИСТЕМЫ ОЗЁР ШИРА – ИТКУЛЬ (ХАКАСИЯ)

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 14-35-50576 мол_пр.

Выполнен расчёт водного баланса озёр Шира и Иткуль, расположенных в аридной зоне в Республике Хакасия (Российская Федерация). Несмотря на то что водоёмы расположены в 3–4 км друг от друга, солёность оз. Шира составляет 12–30 г/кг, оз. Иткуль – менее 1 г/кг. Показано, что озёра гидравлически связаны, причём оз. Иткуль может рассматриваться как сточное. Отток воды из него в оз. Шира ориентировочно оценивается в размере 5 433–8 149 тыс. м³/год (в среднем 6791 тыс. м³/год). С учётом этого только оз. Шира может рассматриваться как бессточный водоём с испарительным механизмом формирования минерализации и химического состава его вод. Озеро Иткуль характеризуется более интенсивным водообменом. Вследствие этого испарение с его водной поверхности в июне–июле не приводит к такому, как в оз. Шира, концентрированию солей. Кроме того, наблюдается меньшее время взаимодействия озёрных вод с донными отложениями.

Ключевые слова: озёра Шира и Иткуль; Хакасия; водный баланс.

Введение

Озеро Шира – меромиктическое озеро площадью около 36 км² и солёностью вод 12–24 г/кг, расположенное в степной зоне на территории Республики Хакасия (Российская Федерация) и активно используемое для рекреационных и бальнеологических целей [1, 2]. Этот водоём давно и достаточно подробно исследуется с различных точек зрения, но до последнего времени не получен убедительный ответ, почему в 3–4 км от него расположено ещё одно большое озеро – Иткуль, но уже с пресной, а не солоноватой (по классификации О.А. Алёкина) водой

[3]. Для ответа на данный вопрос привлекались различные гипотезы [1, 4, 5], но, по мнению авторов, ключевое влияние на формирование примерно в одних и тех же физико-географических условиях столь разных по гидрохимии водных объектов оказывают гидрологические факторы.

Объект и методика исследований

Объектами исследования являются озёра Шира и Иткуль (рис. 1), некоторые гидрологические и гидрохимические характеристики которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

Гидрологическая и гидрохимическая характеристика озёр Шира и Иткуль [1, 3]

Показатель	Единицы измерения	Озеро Шира	Озеро Иткуль
Средняя глубина	м	11,0	9,1
Максимальная глубина	м	24,0	17,0
Площадь акватории	км ²	35,90	23,25
Площадь водосбора	км ²	1020	372
Основные притоки	–	р. Сон	Р. Карыш, ручьи Карасук и Шел-Сух
Водотоки, вытекающие из озера	–	–	Руч. Тушинский (в р. Туим; пересыхает в межень)
Высотная отметка среднего уреза воды	м БС	352,9	456,2
Суммарное содержание растворённых солей	г/кг	12–31	0,6–0,7

Математическая модель формирования водного баланса какой-либо территории в общих чертах имеет следующий вид [6]:

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

где Y_t – слой суммарного водного стока (поверхностного Y_{st} и подземного Y_{gt}) за период времени t (за месяц Y_m или год Y_j); X_t – слой атмосферного увлажнения; Z_t – слой водопритока из смежных водосборов; E_t – слой испарения с поверхности водосбора (E_w) или озёра (E_l) с учетом конденсации влаги (за месяц E_m или год E_j); ΔU_t – изменение влагозапасов в водосборе (ΔU_w) или озере (ΔU_l) за месяц (ΔU_m) или год (ΔU_j); $A_{1,t}$ и $A_{2,t}$ – сброс сточных вод и забор воды; I_t – потери 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 $I_t = 0$). В среднемноголетнем разрезе (для статистически однородного периода по условиям фор-

мирования и изменения стока) в первом приближении обычно предполагается, что величина ΔU_t стремится к нулю. Величина I_t может ориентировочно определена с использованием формулы Ф.И. Быдина [7]:

$$I_m = F_a \cdot 0,11 \cdot \sqrt{\sum T_{a<0}}, \quad (2)$$

где F_a – площадь зеркала, м²; $\sum T_{a<0}$ – сумма отрицательных среднемесячных температур атмосферного воздуха, °С.

Месячное «эффективное» атмосферное увлажнение X_m определяется как сумма значений слоя дождей $P_m(l)$ и водоотдачи $h_m(sm)$ из сезонного снежного покрова, сформировавшегося в холодный период года [8]:

$$X_m = P_m(l) + h_m(sm), \quad (3)$$

$$\frac{dW_{sm,m}}{dt} = P_m(h) - h_{sm,m} - E_m, \quad (4)$$

где $W_{m,m}$ – месячные влагозапасы в снежном покрове; $P_m(h)$ – месячные твердые атмосферные осадки. Водоотдача из снежного покрова вычислена по зависимости от температуры атмосферного воздуха вида

$$h_m(sm) = k_{sm} \cdot T_{a,m}, \quad (5)$$

где $T_{a,m}$ – средняя месячная температура атмосферного воздуха; k_{sm} – коэффициент, по смыслу аналогичный коэффициенту стаявания при среднемесячных значениях покрытия водосбора снегом и стаявания снега, при котором начинается водоотдача [8, 9].

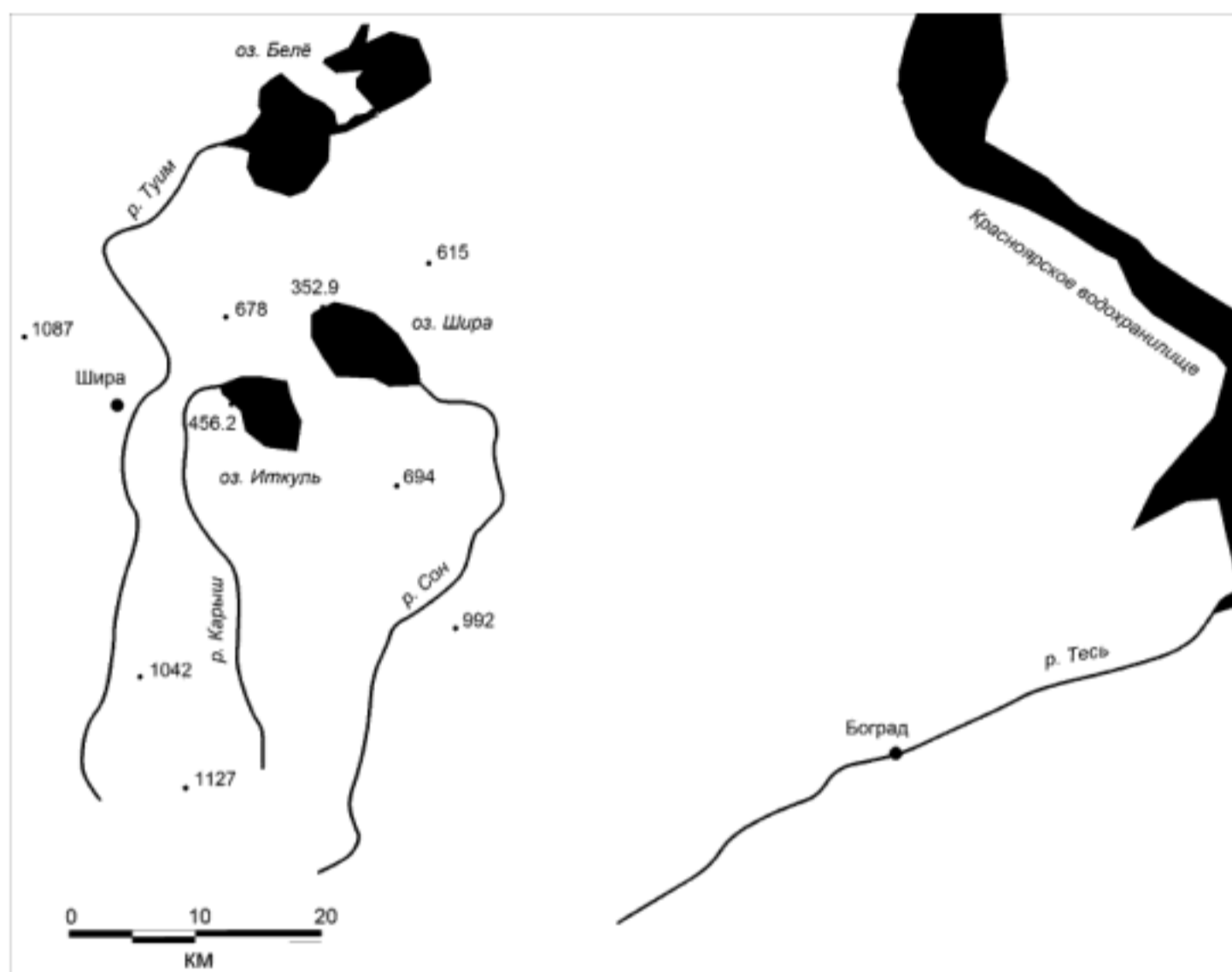


Рис. 1. Схема расположения озёр Ши́ра и Иткуль и высотные отметки поверхности водосборов (значения среднего уреза воды в озёрах: Ши́ра – 352,2 м; Иткуль – 456,2 м)

Месячное испарение с поверхности водосбора $E_{w,m}$ при оценке современного состояния окружающей среды в тёплый период года определяется по методу М.И. Будыко [10–12]:

$$E_m = k_E \cdot E_{0,m} \cdot \frac{W_{slb,m} + W_{sle,m}}{2 \cdot W_{sl0,m}}, \quad (6)$$

$$W_{sle,m} = \frac{W_{slb,m} \cdot \left(1 - \frac{k_E \cdot E_{0,m}}{2 \cdot W_{sl0,m}}\right) + X_m - Y_m}{1 + \frac{k_E \cdot E_{0,m}}{2 \cdot W_{sl0,m}}}, \quad (7)$$

где k_E – безразмерный эмпирический коэффициент; $W_{slb,m}$ и $W_{sle,m}$ – продуктивные влагозапасы почвы (в метровом слое) на начало и конец месяца; $W_{sl0,m}$ – продуктивные влагозапасы почвы (в метровом слое) при наименьшей влагоёмкости, задаются по материалам наблюдений или литературным данным [10, 11,

13]; $E_{0,m}$ – испаряемость. Расчёт влагозапасов почвы проводится с первого месяца, в течение которого в среднем наблюдаются талые грунты или происходит их интенсивное оттаивание (в южнотаёжной подзоне Западной Сибири – обычно в апреле, в подзоне средней тайги – в апреле и мае). При этом начальное значение влагозапасов $W_{slb,0}$ и коэффициент k_E определяются путем подбора, исходя из условия

$$\frac{E_{w,y} - (X_y - Y_y)}{X_y - Y_y} = 0. \quad (8)$$

Испаряемость $E_{0,m}$ вычисляется, согласно [9, 10], по формуле

$$E_{0,m} = 0,69 \cdot N_m \cdot k_{D,m} \cdot (e_{s,m} - e_m), \quad (9)$$

где N_m – количество суток в месяце; $k_{D,m}$ – коэффициент турбулентной диффузии, рассчитываемый в зависимости от средней месячной скорости ветра; $e_{s,m}$ – среднее месячное парциальное давление водяного пара в воздухе; e_m – среднее месячное давление насыщенного пара по температуре испаряющей поверхности

сти [10, 11]. При отрицательных температурах воздуха испарение с поверхности снежного покрова вычисляется по формуле П.П. Кузьмина [14]:

$$E_m = 0,34 N_m D_{a,m} \quad (10)$$

Испарение с водной поверхности определялось, согласно [15], по формуле

$$E_{L,m} = 0,14 \cdot N_m \cdot (e_{s,m} - e_m) \cdot (1 + 0,72 \cdot v_2), \quad (11)$$

где v_2 – среднее значение скорости ветра на высоте 2 м, м/с.

Слой месячного подземного стока $Y_{z,m}$ определяется интерполяцией между значениями стока в феврале и декабре; с декабря по март подземный сток принимается равным речному. Величина $\Delta U_{L,m}$ в режиме

изучения фактического водного баланса озера определяется по уравнению (1) по известным данным об уровнях воды и их связи с площадью акватории по формуле усечённой пирамиды [16]:

$$\Delta U_{L,m} = \frac{\Delta Z}{3} \cdot (F_{a,1} + F_{a,2} + \sqrt{F_{a,1} \cdot F_{a,2}}), \quad (12)$$

где ΔZ – сечение изобат; $F_{a,1}$ и $F_{a,2}$ – площади акватории, ограниченные изобатами.

Более подробное описание математической модели водосбора и алгоритм моделирования приведены в [17]. Калибровка модели проводилась по данным гидрометрических наблюдений на р. Сон у п. Спиринская заимка (табл. 2).

Таблица 2

Исходные данные для моделирования подопритока в оз. Ши́ра

Период	Модуль водного стока р. Сон у п. Спиринская заимка в среднем за 1967–1985 гг., л/(с·км ²)	Модуль водного стока р. Туим у с. Туим в среднем за 1970–1985 гг., л/(с·км ²)	Средняя температура воздуха на м. Ши́ра [18], °С	Средние атмосферные осадки на м. Ши́ра [2], мм
Январь	0,11	1,19	–18,5	6
Февраль	0,08	1,12	–17,2	5
Март	0,20	1,25	–8,9	5
Апрель	1,09	3,06	1,3	19
Май	0,92	2,57	8,9	31
Июнь	0,92	2,15	15,6	50
Июль	1,19	2,81	17,7	77
Август	1,05	2,57	14,9	55
Сентябрь	0,86	2,43	8,8	27
Октябрь	0,74	2,23	1,2	18
Ноябрь	0,35	1,49	–9,1	7
Декабрь	0,17	1,19	–16,4	7
Среднее за год	0,64	2,00	–1,1	–
Сумма за год	–	–	–	306

Исходные данные для определения атмосферного увлажнения и испарения приняты согласно [1, 2, 18, 19] по данным метеостанции Ши́ра, расположенной в нескольких километрах от исследуемых водоёмов. Влагозапасы в метровом слое почвы на начало апреля (152,3 мм) и коэффициент k_{sm} (0,43 мм/(сут·°С)) определены обратным расчётом по формулам (1–4). Забор воды из оз. Иткуль принят по данным [2] в размере 135 тыс. м³/мес., а сброс сточных вод в оз. Ши́ра – равным забору воды из оз. Иткуль.

Результаты исследования и их обсуждение

Выполненные расчёты позволили получить общую картину формирования водного баланса озёр Иткуль и Ши́ра (табл. 3, 4), основными особенностями которого является следующее.

В среднем за многолетний период в водосборе р. Сон и, соответственно, оз. Ши́ра в весенне-летний период происходит накопление влагозапасов, а в осенний и зимний – их сработка (рис. 2). Наибольшее среднемесячное испарение с поверхности водосбора приурочено к августу (77 мм/мес.), испарение с водной поверхности – к июню (132 мм/мес.) и июлю (131 мм/мес.).

Водоприток в оз. Иткуль несколько выше, чем предполагалось ранее, причём настолько, что обеспечивается сток из озера. Часть этого стока приурочена к руч. Тушинскому, в маловодные периоды пересы-

хающему, а в многоводные – выпадающему в оз. Орлово, а затем в р. Туим [2]. Учитывая, что поверхностный сток обычно начинается после накопления определённого влагозапаса в почвогрунтах, то можно предположить, что русловой сток из оз. Иткуль осуществляется на фоне подземного стока.

Озеро Ши́ра расположено в 3–5 км от оз. Иткуль, а уровни в первом водоёме примерно на 100 м ниже, чем во втором. Можно предположить, что сток из оз. Иткуль в сторону оз. Ши́ра (наряду с подрусловым стоком руч. Тушинского и подземным стоком в сторону оз. Берёзовое) является наиболее естественным механизмом выравнивания дисбаланса влаги. Возможности стока в сторону оз. Ши́ра вполне подтверждаются результатами геологических работ ФГУП «Красноярскгеолсъёмка» (доизучение, масштаб съёмки 1: 200 000), выполненных в Кузнецком Алатау на Сорской площади в 1993–2001 гг.

Невязка водного баланса оз. Ши́ра, вычисленная по уравнению (1) для известных значений Y_n , X_n , E_n , ΔU_n , $A_{1,n}$, $A_{2,n}$, I_n , может рассматриваться как сумма водопритока из смежных водосборов Z_i и водообмена с берегами и ложем. Если допустить, что водообмен с ложем и берегами коррелирует с изменением влагозапасов в водосборе ΔU_i (рис. 2) и в целом за год также стремится к нулю, то значение невязки годового баланса может быть интерпретировано как объём перетока воды из оз. Иткуль в оз. Ши́ра (табл. 3, 4).

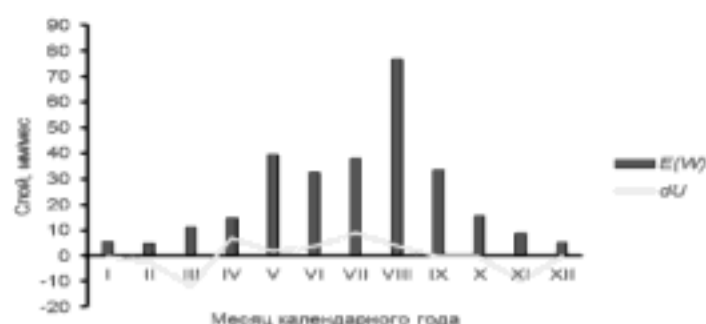


Рис. 2. Внутригодовое распределение испарения ($E(W)$, с поверхности водосбора) и изменения влагозапасов (dU) водосбора р. Сон у п. Спиринская Займка в среднем за многолетний период

По полученным данным, эта величина составляет 6 791 тыс. м³/год, или примерно 0,22 м³/с, что сопоставимо со среднемноголетними расходами воды рек Туим у п. Туим и Тесь у п. Боград (по 0,23 м³/с) и несколько меньше нормы стока р. Сон у п. Спиринская Займка (0,31 м³/с). Погрешность измерения расходов воды методом «скорость – площадь» обычно не менее 5%, а расчётное определение элементов водного баланса – около 20% [20], или 1 358 тыс. м³/год. Соответственно, годовой сток воды из оз. Иткуль в оз. Шира в среднем за многолетний период ориентировочно оценивается в диапазоне от 5 433 до 8 149 тыс. м³/год (от 0,17 до 0,26 м³/с соответственно).

Таблица 3

Водный баланс оз. Шира, тыс. м³

Период	Атмосферные осадки на поверхность озера	Испарение с водной поверхности, тыс. м ³	Суммарный водоприток р. Сон	Подземный приток с водосбора (кроме р. Сон)	Сброс стоков	Потери воды на льдообразование	Изменение объёма озёрных вод по уровням воды	Невязка баланса – подземный водоприток из оз. Иткуль*
Январь	200,4	0,0	168,8	109,1	0,0	23 708,3	-352,1	22 878,0
Февраль	100,2	0,0	116,7	75,4	0,0	28 064,8	352,1	28 124,7
Март	0,0	0,0	319,7	92,7	0,0	30 072,3	1 058,5	30 894,9
Апрель	1 272,5	1 790,5	1 660,0	98,5	0,0	11 669,8	2 839,1	14 776,0
Май	1 109,3	3 579,2	1 441,0	111,0	0,0	-121 608,3	1 070,8	-118 350,8
Июнь	1 784,2	4 754,9	1 396,2	116,2	135,0	0,0	1 074,2	3 883,8
Июль	2 771,5	4 695,7	1 862,7	129,3	139,5	0,0	358,8	2 093,3
Август	1 956,6	3 560,3	1 637,5	138,4	139,5	0,0	-3 571,2	-2 180,6
Сентябрь	954,9	1 968,5	1 306,1	142,8	0,0	0,0	2 138,2	2 788,1
Октябрь	631,8	845,0	1 156,9	156,7	0,0	0,0	-1 070,8	-1 256,8
Ноябрь	0,0	0,0	534,9	160,5	0,0	10 219,0	0,0	9 810,2
Декабрь	200,4	0,0	270,8	175,0	0,0	17 874,2	-3 897,6	13 330,5
Год	10 981,8	21 194,0	11 871,3	1 505,6	414,0	0,0	0,0	6 791,2

* Невязка баланса интерпретируется в целом для года как водоприток из оз. Иткуль, по месяцам – как сумма водопритока из оз. Иткуль, водообмен с ложем и берегами и изменение объёма воды при образовании и таянии ледяного покрова.

Таблица 4

Водный баланс оз. Иткуль, тыс. м³

Период	Атмосферные осадки на поверхность озера	Испарение с водной поверхности, тыс. м ³	Суммарный водоприток р. Карыш	Подземный приток с водосбора (кроме р. Карыш)	Забор воды	Потери воды на льдообразование	Отток воды в оз. Шира*	Изменение объёма озёрных вод**
Январь	129,8	0,0	441,7	369,0	0,0	15 556,5	22 878,0	-37 494,0
Февраль	64,9	0,0	370,3	309,4	0,0	18 346,8	28 124,7	-45 727,0
Март	0,0	0,0	477,0	345,8	0,0	19 635,6	30 894,9	-49 707,7
Апрель	824,1	1 159,6	1 215,1	337,9	0,0	7 717,6	14 776,0	-21 276,1
Май	718,4	2 318,0	1 056,5	352,4	0,0	-80 173,9	-118 350,8	198 334,1
Июнь	1 155,5	3 079,4	876,8	344,2	135,0	0,0	3 883,8	-4 721,7
Июль	1 794,9	3 041,1	1 181,6	359,0	139,5	0,0	2 093,3	-1 938,3
Август	1 267,1	2 305,7	1 076,3	362,3	139,5	0,0	-2 180,6	2 441,1
Сентябрь	618,5	1 274,9	963,5	353,8	0,0	0,0	2 788,1	-2 127,2
Октябрь	409,2	547,2	906,2	368,9	0,0	0,0	-1 256,8	2 393,9
Ноябрь	0,0	0,0	566,1	360,2	0,0	7 074,7	9 810,2	-15 958,5
Декабрь	129,8	0,0	449,4	375,5	0,0	11 842,8	13 330,5	-24 218,6
Год	7 112,2	13 725,9	9 580,4	4 238,5	414,0	0,0	6 791,2	0,0

* Отток воды из оз. Иткуль принят равным невязке водного баланса оз. Шира, а изменение объёма озёрных вод вычислена по уравнению (1).

** Изменение объёма воды в оз. Иткуль предположительно содержит систематическую ошибку вследствие неучёта стока в р. Туим и оз. Берёзовое.

Если принять, что ширина потока из оз. Иткуль в оз. Шира составляет примерно 6 км, средняя мощность водоносных отложений – 75 м, уклон – 0,00295 (м/м), то средняя скорость движения подземных вод будет 0,041 м/сут, а коэффициент фильтрации – 1,391 м/сут.

В течение года водный баланс исследуемых озёр характеризуется, во-первых, преобладанием испаре-

ния с водной поверхности над приходными компонентами в июне–июле, что свидетельствует о существенной роли испарительного механизма формирования химического состава озёрных вод в этот период (табл. 3, 4).

Во-вторых, оз. Иткуль, строго говоря, нельзя признать бессточным водоёмом вследствие оттока воды

по русловой сети в р. Туим и в виде фильтрационно-го потока – в р. Туим и рядом расположенные водоёмы. Следовательно, испарение оказывает значительно меньшее влияние на формирование химического состава вод оз. Иткуль в сравнении с оз. Шира, что и является ключевой причиной различия минерализации двух водоёмов (до 1 г/кг в оз. Иткуль и 12–30 г/кг – в оз. Шира).

В-третьих, в зимние месяцы происходит изъятие значительных объёмов воды на льдообразование, а в мае (фактически в апреле и мае), напротив, – их относительно резкое поступление в озеро. В оз. Шира это, предположительно, приводит к поддержанию устойчивой стратификации водных масс за счёт того, что верхние слои менее плотные по сравнению с нижними. Для пресного оз. Иткуль эта разница не столь существенна и компенсируется ветровым перемешиваем и внутриозёрными течениями.

Заключение

В результате выполненного исследования показано, что в аридной зоне примерно в одинаковых

физико-географических условиях могут наблюдаться существенные различия в формировании водного баланса крупных озёр, которые определяют кардинальное различие в минерализации и химическом составе их вод. В рассмотренном случае озёра Шира и Иткуль представляют собой гидравлически связанную систему (каскад) водоёмов, последний из которых выполняет роль сточного водохранилища.

Подземный сток из пресного оз. Иткуль в оз. Шира с солёностью 12–30 г/кг ориентировочно составляет 5 433–8 149 тыс. м³/год (в среднем 6 791 тыс. м³/год). С учётом этого только оз. Шира может рассматриваться как бессточный водоём с испарительным механизмом формирования минерализации и химического состава его вод. Озеро Иткуль характеризуется более интенсивным водообменом, в условиях которого: 1) испарение с водной поверхности в июне–июле не приводит к такому, как в оз. Шира, концентрированию солей; 2) наблюдается меньшее время взаимодействия озёрных вод с донными отложениями.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Природный комплекс и биоразнообразие участка «Озеро Шира» заповедника «Хакасский»* / под ред. В.В. Непомнящего. Абакан : Хакас. книж. изд-во, 2011. 420 с.
2. Гусева Н.В., Копылова Ю.Г., Хвацинская А.А., Сметанина И.В. Химический состав соленых озер Северо-Минусинской котловины, Хакасия // *Известия Томского политехнического университета*. 2012. Т. 321, № 1. С. 163–168.
3. *Природный комплекс и биоразнообразие участка «Озеро Иткуль» заповедника «Хакасский»* / под ред. В.В. Непомнящего. Абакан : Хакас. книж. изд-во, 2010. 418 с.
4. *Природные воды Ширинского района республики Хакасия* / под ред. В.П. Парначёва. Томск : Изд-во Том. гос. ун-та, 2003. 183 с.
5. 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 // *Applied Geochemistry*. 2004. V. 19, № 12. P. 1905–1926.
6. 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.
7. Лебедев В.В. Гидрология и гидрометрия в задачах. Л. : Гидрометеониздат, 1955. 551 с.
8. Гельфан А.Н. Динамико-стохастическое моделирование формирования талого стока. М. : Наука, 2007. 279 с.
9. Бефани Н.Ф., Калинин Г.П. Упражнения и методические разработки по гидрологическим прогнозам. Л. : Гидрометеониздат, 1983. 390 с.
10. *Методические рекомендации по оценке влияния хозяйственной деятельности на сток средних и больших рек и восстановлению их характеристик* / под ред. Е.Э. Булаховской. Л. : Госкомгидромет, 1986. 78 с.
11. *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.
12. Бudyko M.I. Тепловой баланс земной поверхности. Л. : Гидрометеониздат, 1956. 255 с.
13. Лучишева А.А. Практическая гидрология. Л. : Гидрометеониздат, 1976. 440 с.
14. *Ресурсы поверхностных вод СССР*. Т. 15 : Алтай и Западная Сибирь. Вып. 2 : Средняя Обь. Л. : Гидрометеониздат, 1972. 408 с.
15. *Методика расчёта водохозяйственного баланса водных объектов*. Утв. Приказом МПР России от 30.11.2007 г. № 317. М. : МПР России, 2007. 41 с.
16. Богословский Б.Б. Озероведение. М. : Изд-во МГУ, 1960. 335 с.
17. Савичев О.Г. Математическое моделирование формирования водного стока рек Западной Сибири // *Инженерные изыскания*. 2012. № 8. С. 40–48.
18. СНиП 23-01-99*. Строительная климатология. М. : Госстрой России, ГУП ЦПП, 2003. 162 с.
19. *Ресурсы поверхностных вод СССР*. Т. 16 : Ангаро-Енисейский район. Вып. 1 : Енисей. Л. : Гидрометеониздат, 1973. 723 с.
20. *Мелиорация и водное хозяйство*. Т. 5 : Водное хозяйство / под ред. И.И. Бородавченко. М. : Агропромиздат, 1988. 399 с.

Статья представлена научной редакцией «Науки о Земле» 07 ноября 2014 г.

WATER BALANCE OF THE SHIRA – ITKUL LAKE SYSTEM (KHAKASSIA)

Tomsk State University Journal, 2015, 391, 214–219. DOI 10.17223/15617793/391/34

Savichev Oleg G. Tomsk Polytechnic University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: OSavichev@mail.ru

Guseva Natalia V. Tomsk Polytechnic University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: guseva24@yandex.ru

Abdullaev Bahrom D. Institute of Hydrogeology and Engineering Geology of O.K. Lange (Tashkent, Uzbekistan). E-mail: BahromAbdullaev@freemail.uz

Keywords: Shira Lake; Itkul Lake; Khakassia; water balance.

Shira and Itkul lakes (the lake water surface areas are 35.90 and 23.25 km² respectively) are located in the steppe zone in Khakassia (Russian Federation). The distance between lakes is 3 to 4 km. The conditions of water resource formation for both reservoirs are similar. However, the salinity of Shira Lake is 12–30 g/kg, the salinity of Itkul Lake is less than 1 g/kg. The mathematical model of lake water balance formation on the average for the long-term period was developed for an explanation of these differences. The evaporation from the catchment surfaces at the snow cover presence was calculated using the P.P. Kuzin method. The M.I. Budyko

method was used in case of snow cover absence. The evaporation from water surfaces was estimated using the turbulent diffusion method (depending on the wind velocity and humidity deficit). The catchment moistening was calculated as the sum of liquid atmospheric precipitation and snow melt. The annual water redistribution is considered due to the formation and melting of the seasonal ice cover. The Son River flow into Shira Lake was determined using long-term observation data delivered by the Russian Federal Hydrometeorology and Environmental Monitoring Service (Roshydromet). The Karysh River flow into Itkul Lake was estimated according to the annual mean discharge, which is $1.6 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$. The annual mean discharge was calculated as the mean value of the Son River flow (at the point near village Spirinskaya Zaimka) and the Tuim River flow (at the point near village Tuim). The groundwater inflow to the lakes corresponds to the groundwater discharge into rivers (the Son River for Lake Shira and the Karysh River for Lake Itkul). The groundwater discharge corresponds to the river flows from December to February. From March till November it is defined by linear interpolation between the values for February and December. Wastewater dump in Shira Lake corresponds to the water drawoff from Itkul Lake. The annual change of the volume of waters of Shira Lake is calculated according to the Roshydromet data about average monthly lake water levels. The difference between water inflow and outflow in Shira Lake is determined. This difference as a whole for one year can be considered as groundwater inflow. Its average volume is $6791,000 \text{ m}^3/\text{year}$ (the calculation error is $5433,000\text{--}8149,000 \text{ m}^3/\text{year}$). The groundwater inflow is possible from Itkul Lake, the water level in which is 100 m higher than that in Shira Lake. Thus the average groundwater velocity is $0.041 \text{ m}/\text{day}$, and the value of hydraulic conductivity is $1.391 \text{ m}/\text{day}$. Thus, these lakes are connected (hydraulic connection). Itkul Lake can be considered as the drainage lake. Only Shira Lake can be considered as a reservoir without a water flow. The mechanism of its water salinity formation is determined, first of all, by evaporation of water. Itkul Lake is characterized by more active water exchange in comparison with Shira Lake. Therefore, evaporation from its water surface in June–July does not result in the high salinity like in Shira Lake. Besides, little time of water-sediment interaction is observed.

REFERENCES

1. Nepomnyashchiy V.V. (ed.) *Prirodnyy kompleks i bioraznoobrazie uchastka "Ozero Shira" zapovednika "Khakasskiy"* [Nature complex and biodiversity of the Lake Shira area of Khakassky Reserve]. Abakan: Khakasskoe knizhnoe izd-vo Publ., 2011. 420 p.
2. Guseva N.V., Kopylova Yu.G., Khvashchevskaya A.A., Smetanina I.V. Chemical composition of salt lakes in Severo-Minusinsk depression, Khakasiya. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 1, pp. 163–168. (In Russian).
3. Nepomnyashchiy V.V. (ed.) *Prirodnyy kompleks i bioraznoobrazie uchastka "Ozero Itkul" zapovednika "Khakasskiy"* [Nature complex and biodiversity of the Lake Itkul area of Khakassky Reserve]. Abakan: Khakasskoe knizhnoe izd-vo Publ., 2010. 418 p.
4. Parnachev V.P. (ed.) *Prirodnye vody Shirinskogo rayona respubliki Khakasiya* [Natural water of Shira District of the Republic of Khakassia]. Tomsk: Tomsk State University Publ., 2003. 183 p.
5. 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. *Applied Geochemistry*, 2004, vol 19, no. 12, pp. 1905–1926. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2004.05.009
6. 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.
7. Lebedev V.V. *Gidrologiya i gidrometriya v zadachakh* [Hydrology and hydrometrics in problems]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1955. 551 p.
8. Gel'fan A.N. *Dinamiko-stokhasticheskoe modelirovanie formirovaniya talogo stoka* [Dynamic-stochastic modeling of snowmelt runoff formation]. Moscow: Nauka Publ., 2007. 279 p.
9. Befani N.F., Kalinin G.P. *Uprazhneniya i metodicheskie razrabotki po gidrologicheskim prognozam* [Exercises and methodological developments in hydrological forecasts.]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1983. 390 p.
10. Bulakhovskaya E.E. (ed.) *Metodicheskie rekomendatsii po otsenke vliyaniya khozyaystvennoy deyatel'nosti na stok srednikh i bol'shikh rek i vosstanovleniyu ikh kharakteristik* [Guidelines for assessing the impact of economic activity on the stock of medium and large rivers and the restoration of their characteristics]. Leningrad: Goskomgidromet Publ., 1986. 78 p.
11. Bulakhovskaya E.E. (ed.) *Metodicheskie rekomendatsii po uchetu vliyaniya khozyaystvennoy deyatel'nosti na stok malyykh rek pri gidrologicheskikh raschetakh dlya vodokhozyaystvennogo proektirovaniya* [Guidelines for the calculation of the influence of economic activity on the runoff of small rivers with hydrological calculations for water use design]. Leningrad: Goskomgidromet Publ., 1986. 168 p.
12. Budyko M.I. *Teplovoy balans zemnoy poverkhnosti* [Heat balance of the earth's surface]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1956. 255 p.
13. Luchsheva A.A. *Prakticheskaya gidrologiya* [Applied Hydrology]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1976. 440 p.
14. *Resursy poverkhnostnykh vod SSSR* [Surface water resources in the USSR]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1972. Vol. 15, issue 2, 408 p.
15. *Metodika rascheta vodokhozyaystvennogo balansa vodnykh ob'ektov. Utv. Prikazom MPR Rossii ot 30.11.2007 g. no. 317* [The methodology of calculation of the water balance of water bodies. Approved by the Order of the Ministry of Natural Resources of Russia on 30.11.2007 no. 317]. Moscow: Russian Ministry of Natural Resources Publ., 2007. 41 p.
16. Bogoslovskiy B.B. *Ozerovedenie* [Limnology]. Moscow: Moscow State University Publ., 1960. 335 p.
17. Savichev O.G. Mathematic modeling of the water runoff of the taiga zone rivers. *Inzhenernye izyskaniya – Engineering Surveys*, 2012, no. 8, pp. 40–48. (In Russian).
18. SNiP (Construction Rules and Regulations) 23-01-99*. *Stroitel'naya klimatologiya* [Building Climatology]. Moscow: Gosstroy Rossii, GUP TsPP Publ., 2003. 162 p.
19. *Resursy poverkhnostnykh vod SSSR* [Surface water resources in the USSR]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1973. Vol. 16, issue 1, 723 p.
20. Borodavchenko I.I. (ed.) *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo* [Irrigation and Water Management]. Moscow: Agropromizdat Publ., 1988. Vol. 5, 399 p.

Received: 07 November 2014