

А.М. Догановский, М.И. Нестерева

ВОДНЫЙ БАЛАНС И ВНЕШНИЙ ВОДООБМЕН ОЗЕР ЯКУТИИ

A.M. Doganovsky, M.I. Nestereva

WATER BALANCE AND EXTERNAL WATER EXCHANGE OF LAKES IN YAKUTIA

Рассматриваются особенности формирования внешнего водообмена озер Якутии, определяющего их транзитно-аккумуляционные свойства. Разработаны способы количественной оценки интенсивности водообмена, в том числе для неизученных водоемов. Для этих целей выявлены закономерности строения разнотипных озерных котловин и определены структуры их водных балансов.

Ключевые слова: озера, коэффициенты водообмена, транзит и аккумуляция, озерные котловины, морфометрия, удельные водосборы, водный баланс.

The features of the formation of the external water exchange Lakes of Yakutia which determines their transit accumulative properties are considered. Methods for quantifying the intensity of water exchange are developed including unexplored reservoirs. For these purposes, the regularities of the structure of different types of lake basins and determined the structure of their water balance.

Key words: lake, coefficient water exchange, transit and accumulation, lake basin, morphometry, unit watersheds, water balance.

Введение

На территории Якутии насчитывается более 723 тысяч естественных озер, которые распространены повсеместно. Однако наибольшее распространение этих водоемов приурочено к равнинным территориям с затрудненным стоком воды: Приморской и Центрально-Якутской низменностям, Вилюйскому плоскогорью. Меньше всего озер на юге Якутии и в горах. Большинство озер имеют площади менее 1 км² и лишь 32 озера — более 50 км², в том числе 10 озер более 100 км². Самое большое озеро Нерпичье имеет площадь 350 км². Расположенные в разных частях обширной территории Якутии в различных физико-географических, климатических условиях котловины озер имеют различное происхождение, разнообразны черты гидрологического режима. Отсюда и интерес человека к этим объектам разный. Кроме того, большая часть озер расположена в малонаселенных и труднодоступных районах. Поэтому человеком используется относительно небольшая часть озерного фонда. Трудности возникают также в связи со слабой гидрологической и экологической изученностью водоемов. По данным [1], на рассматриваемой территории в настоящее время действует лишь 7 пунктов наблюдений за гидрологическими процессами и водными экосистемами озер. Гораздо больше сведений о батиметрии. Поэтому всегда возникает необходимость разработки приемов хозяйственных расчетов при эксплуатации неизученных и слабо изученных водоемов.

В настоящее время озера Якутии используются для водоснабжения, водоотведения, рыболовства, рекреации, добычи сапропеля, бальнеологии. Особое значение имеют земельные ресурсы озер и приозерных ландшафтов. Следует также обратить внимание на особенности использования озер — все они продолжительное время покрыты льдом. Поэтому изучение озер Якутии, направленное на их использование в хозяйственной деятельности человека, — задача актуальная и не простая.

Установлено, что многие черты гидрологического режима, внутриводоемных процессов, физико-химических свойств озерных вод, транзитно-аккумуляционных особенностей связаны с интенсивностью водообмена водных масс. Особое место при этом отводится внешнему водообмену, отражающему время пребывания в котловине поступающей воды за рассматриваемую единицу времени. Количественным выражением этого процесса является условный коэффициент внешнего водообмена (K_b).

Процесс водообмена, в том числе на неизученных объектах в настоящее время широко изучается в других озерных районах страны [3, 8, 18, 20]. Для озер Якутии этот вопрос представляется новым, поэтому настоящая работа и посвящена изучению внешнего водообмена разнотипных озер республики. Для решения этой задачи рассмотрены условия формирования водообмена, связанного с водным балансом озер и особенностями строения озерных котловин и озерных систем в целом. Поэтому в первую очередь уделено внимание изучению водного баланса озер, оценке его структуры, выявлению сточных, бессточных и периодически сточных озер. Также предлагается схема определения размеров и форм котловин для неизученных объектов. Учитывая большие размеры территории Якутии, расположенной в разных физико-географических зонах, большое место в работе отведено географическим обобщениям. Одним словом, при решении поставленных задач возникает необходимость широкого изучения озерного фонда республики.

Происхождение и закономерности строения озерных котловин

Геологическое строение и рельеф территории Якутии отличается сложностью и разнообразием. Сама территория принадлежит преимущественно к двум крупнейшим тектоническим структурам: Сибирской платформе, являющейся частью Среднесибирского плато и Верхояно-Чукотской складчатой области. Сибирская платформа представлена плоскогорьями, плато, равнинами. Для Верхояно-Чукотской области характерны горные хребты (Верхоянский, Сунтар Хаята, Черского), чередующиеся с низменностями. Следует также обратить внимание на важные геоморфологические единицы: Анабарское плато на севере, Алданское нагорье на юго востоке и Центрально-Якутскую низменность в центре рассматриваемой территории. Такое разнообразное строение поверхности территории Якутии, условия сурового климата, наличие многолетнемерзлых горных пород привело к большому разнообразию озерных котловин и озерных систем в целом. Решающую же роль играют неодинаковые причины возникновения котловин и время их эволюции. В процессе эволюции в разных условиях увлажнения территории котловины озер подвергаются переработке и их первоначальные характеристики меняются.

Таким образом, озера расположенные в разных частях рассматриваемой территории, имеют разные размеры, глубины, формы котловин, удельные водосборы. Разнообразны

и другие морфометрические показатели. В настоящее время согласно лимногенетической классификации озер Северо Востока России, в том числе и Якутии, разработанной в лаборатории озераведения СВФУ И.И. Жирковым [2, 9], выделено 14 типов, 29 подтипов озер и целый ряд их разновидностей. Среди них наиболее распространенными и изученными являются котловины озер термокарстового, водно-эрозионного, эрозионно-термокарстового и тектонического происхождения. Всего привлечены сведения по 422 таким объектам. Для того чтобы представить особенности строения котловин неизученных озер, необходимо установить закономерности изученных и представить их в виде аналогов. Такие работы для Якутии были обоснованы и выполнены, а результаты представлены в [14]. В табл. 1 приведены формулы для определения объемов воды (V_0) в неизученных котловинах. В качестве аргументов представлены площади озер (A_0). Каждое из представленных уравнений соответствует определенному типу котловин, а следовательно, и району, в котором эти котловины преобладают.

Таблица 1

Формулы для определения объёма воды в озере

| Тип котловины | Формулы |
|--------------------------|------------------------|
| Термокарстовые | $V = 0,0022 A^{1,15}$ |
| Водно-эрозионные | $V = 0,0012 A^{1,004}$ |
| Эрозионно-термокарстовые | $V = 0,0035 A^{1,26}$ |
| Ледниковые | $V = 0,02 A^{2,4}$ |
| Тектонические | $V = 0,0795 A^{2,80}$ |

Водный баланс озер и оценка его элементов

Оценка интенсивности внешнего водообмена озер теснейшим образом связана с их водным балансом. Однако при определении водообмена большую роль играют не только правильно подобранные и правильно рассчитанные элементы баланса, но и сама его структура. Например, необходимо знать, как велика доля притока воды по рекам в приходной части баланса и какова доля стока — в расходной. При этом, как отмечено выше, часто возникает необходимость определения баланса при отсутствии наблюдений. Поэтому исследование уравнения водного баланса, умение рассчитать его элементы, тем более, что для Якутии этот вопрос остается слабоизученным, также представляется задачей чрезвычайно актуальной.

Водный баланс, определяемый процессами прихода и расхода воды, формирующейся разными источниками, применительно к озерам представляет собой частный случай фундаментального закона естествознания — закона сохранения материи (массы). Баланс также является главной характеристикой гидрометеорологического режима водоемов. На основе водного баланса помимо рассмотрения водообмена изучаются физические и химические процессы, происходящие в водоемах. Одновременно баланс позволяет оценить эффект хозяйственных мероприятий, связанных с использованием водных ресурсов и увидеть совокупное воздействие всех факторов,

которые влияют на изменение запасов воды в озере. Водный баланс также необходим при определении стока из озера при отсутствии сведений по этой составляющей.

Математическим выражением водного баланса является уравнение баланса. В общем виде это уравнение для многолетнего периода, представленного в объемных единицах, имеет вид:

$$V_{\text{пр}} + V_{\text{ос}} - V_{\text{ст}} - V_{\text{исп}} = \pm V_{\text{акк}}, \quad (1)$$

где $V_{\text{пр}}$ — приток воды по рекам; $V_{\text{ос}}$ — атмосферные осадки на водную поверхность; $V_{\text{ст}}$ — сток воды из озера по реке; $V_{\text{исп}}$ — испарение с поверхности водоема; $\pm V_{\text{акк}}$ — аккумуляция воды в озерной котловине (накопление или расходование).

Элементы уравнения можно также представить в мм слоя:

$$\frac{V_{\text{пр}}}{A_0(H)} + P - \frac{V_{\text{ст}}}{A_0(H)} - E = \pm \Delta H, \quad (2)$$

где A_0 — площадь водной поверхности озера; H — уровень воды в озере; P — атмосферные осадки на озеро; E — испарение с его поверхности; ΔH — приращение уровня. Для бессточных озер, которых на территории Якутии много, $V_{\text{ст}} = 0$. Очень часто при увеличении числа лет, за которые составляется баланс, сумма приходных составляющих равна сумме расходных, тогда $\Delta V(\Delta H) = 0$ и баланс становится равновесным.

Уравнения водного баланса (1) и (2) представлены наиболее значимыми элементами, как правило, встречающимися ежегодно при осреднении их за многолетний период. Все перечисленные элементы баланса, прежде всего, связаны с климатом (осадки, увлажнение, температура и т.п.). Важную роль при формировании элементов водного баланса играют также особенности строения озерных систем (размеры, величины удельных водосборов, формы котловин и русел вытекающих рек и др.).

Определение составляющих баланса не представляет труда, если есть данные наблюдений за речным стоком, атмосферными осадками, температурой и т.п. Однако такие наблюдения в Якутии крайне ограничены. Особенно это касается водоемов, расположенных в малонаселенных районах республики. Например, нет стационарных пунктов наблюдений за речным стоком, нет уровенных постов на озерах, редка сеть метеостанций. А специальные наблюдения на водоемах весьма отрывочны и связаны лишь с экспедиционными исследованиями. Поэтому при решении уравнения водного баланса в основном приходится пользоваться косвенными методами определения его составляющих, что, безусловно, снижает точность расчетов. Для решения нашей задачи требуется расчет баланса за многолетний период. При этом рассматривается равновесный баланс.

Приток воды по рекам и подземным путем. Там, где имеются наблюдения за стоком на водосборах озер, задача сводится к суммированию расходов с освещенных наблюдениями площадей ($A_{\text{ос}}$). Наряду с площадями, освещенными наблюдениями, в состав озерных водосборов входят территории не освещенные наблюдениями

($A_{\text{но}}$) и суммарный приток в озеро складывается из стока воды с площадей $A_{\text{ос}}$ и $A_{\text{но}}$. Анализ исходного материала показал, что большинство озерных водосборов Якутии не освещены наблюдениями даже частично. Поэтому определение притока воды в озеро полностью следует производить косвенными способами. В настоящее время такие способы разработаны и приведены в соответствующих инструкциях и книгах [10, 16, 20]. Для определения притока за многолетний период можно использовать имеющиеся достаточно подробные карты модулей или слоев стока территории Якутии. Например, карты, приведенные в «Ресурсах поверхностных вод...» [16]. При этом следует определить площади водосборов исследуемых озер. Всего определены площади для 422 объектов.

Подземный приток в реки и озера Якутии, по данным О.Н. Толстихина [16, 19] незначительный. В местах расположения исследуемых типов озер величина модуля подземного стока равна $0,01-1,0$ л/(с·км²). Большинство рассматриваемых озер располагаются на криогенном водоупоре и, как правило, имеют малые глубины. Поэтому доля подземной составляющей в притоке воды мала.

Атмосферные осадки на поверхность озера играют заметную роль в водном балансе озер. Доля осадков в приходной части баланса возрастает при уменьшении величин удельных водосборов. Распределение по территории Якутии годовых осадков за многолетний период крайне неравномерное и изменяется от 150 до 500 мм в год. Для решения уравнения водного баланса использованы имеющиеся карты распределения многолетних осадков по территории Якутии [16].

Сток воды из озера. Правильное определение стока воды из озера имеет большое значение для определения коэффициента водообмена по стоку, значение которого положено в основу определения транзита веществ из озера. Этот сток определяется по данным пункта наблюдения за стоком, расположенного на вытекающей реке. По нашим сведениям таких пунктов на озерах Якутии практически нет. В ряде случаев такие пункты находятся на значительном расстоянии от озера и требуются определенные действия для переноса результатов измерения расходов в истоки реки. В таких случаях следует также воспользоваться косвенными способами. Для этих целей решено уравнение равновесного водного баланса ($\Delta V(\Delta H) = 0$) относительно $V_{\text{ст}}$:

$$V_{\text{ст}} = V_{\text{пр}} + (V_{\text{ос}} - V_{\text{исп}}), \quad (3)$$

где ($V_{\text{ос}} - V_{\text{исп}}$) — «видимое испарение», или уравнение, представленное в мм слоя воды:

$$h_{\text{ст}} = h_{\text{пр}} + (P - E). \quad (4)$$

Привлекая карту многолетнего речного стока Якутии определен приток воды в озеро, затем рассчитаны величины «видимого испарения».

Испарение с поверхности озер происходит в течение всего года и определяется путем расчета. При этом в теплую часть года испарение происходит с воды, в холодную — со льда. Продолжительность периода открытой воды составляет от 80 дней на севере территории до 100 дней на юге. Основная масса испарившейся воды приходится на июнь — сентябрь на севере и на июнь — октябрь на юге.

Фактические наблюдения за испарением с помощью плавучих испарителей или оценки испарения со стандартных испарительных бассейнов (20 м²) в Якутии не проводились. Затруднен расчет испарения по известным формулам рекомендуемым соответствующими указаниями [16, 20]. В этих случаях надо располагать большим количеством исходных данных получаемых на метеостанциях. Поэтому для получения многолетних величин испарения с водной поверхности следует воспользоваться картами испарения, построенными по ограниченному числу исходных данных. В настоящее время такие карты, в том числе для территории Якутии, построены А.Н. Постниковым [15] с привлечением лишь доступных стандартных данных по температуре воздуха. Для этих целей разработана формула определения испарения за теплый безледный период года:

$$E = 4(21,3 t_n + 27)(0,026 t_n + 0,62) \text{ мм}, \quad (5)$$

где t_n — многолетняя температура воздуха за безледный период.

Таким образом, зная лишь температуру воздуха над водоемом, можно определить величину испарения. В работе также доказывается возможность не учитывать глубину озера для многолетнего периода при отсутствии ледяного покрова. Уравнение (5) положено в основу построения карты испарения с поверхности водоемов за безледный период. Для построения карты автор использовал данные по температуре воздуха по 43 метеостанциям, расположенным на территории Якутии. Из рисунка, приведенного в [15], следует, что для рассматриваемой территории величина E плавно повышается с севера на юг от 150 мм в год за безледный период в зоне тундр до 400 мм в центральной Якутии в степной зоне. На юге за счет увеличения высоты местности испарение уменьшается до 300 мм. Следует отметить, что в условиях холодного континентального климата испарение с ледяного покрова незначительно, и, по данным [11], оно не превышает 5–7 % от многолетней величины E . Можно также предположить, что испарение с водной поверхности примерно соответствует величине испаряемости (E_0) в этом районе.

Структура водного баланса озер Якутии

Особенности режимных характеристик озера, функционирование его экосистемы, преобладание аллохтонных или автохтонных процессов во многом определяются структурой водного баланса, т.е. преобладанием тех или иных источников питания (приток по рекам, атмосферные осадки т.п.) или особенностями формирования потерь из озера (испарение, сток, фильтрация и т.п.). Особенно важно иметь представление о структуре баланса при оценке транзитно-аккумуляционных свойств водоема.

Структура водного баланса озера показывает устойчивый способ связи его элементов и обеспечивает качественную определенность всей озерной системы. Например, в приходной части баланса озера Байкал на поверхностный приток приходится 85 %, а 15 % на атмосферные осадки и подземные воды. 84 % расходной части составляет сток Ангары. Для озера Большие Чаны приток по рекам составляет 68 %, сток равен 0, а испарение 100 %. Для озера Леприндо, по нашим расчетам, приток составляет

92 %, сток 96 %. В то же время для многих озер Якутии сток равен 0. Таким образом, структура водного баланса определяется местоположением водоема, т.е. климатом и строением озерной системы.

Исходя из этого выявлены важные условия и закономерности, определяющие соотношения элементов баланса. Такие исследования для озер различных территорий ранее были выполнены К.К. Эдельштейном [20], А.М. Комлевым [10], А.М. Догановским [8]. Для озер Якутии эта задача решена более подробно. Перечисленные закономерности сводятся к формированию нелинейных связей между долей какой-либо составляющей в приходной или расходной частях баланса с условиями увлажнения и особенностями строения озерных систем. Для озер различных природных зон это положение можно выразить с помощью уравнения (1), представленного в мм слоя за многолетний период при $\Delta H = 0$. Согласно этому уравнению приток воды в озеро с водосбора равен:

$$h_{\text{пр}} = \frac{V_{\text{пр}}}{A_0} = \frac{h_{\text{пр.б}} A_0}{A_0} = h_{\text{пр.б}} K, \quad (6)$$

где $h_{\text{пр.б}}$ — величина речного стока на водосборе (мм); A_0 — площадь водосбора; K — показатель удельного водосбора ($K = A_0/A_0$).

Доля стока в расходной части баланса (Y) равна:

$$Y = \frac{h_{\text{пр.б}} K + P - E}{h_{\text{пр.б}} K + P}, \quad (7)$$

или, разделив числитель и знаменатель на P , получим:

$$Y = 1 - \frac{\frac{E}{P}}{\frac{h_{\text{пр.б}} K}{P} + 1}, \quad (8)$$

где $E/P = \alpha_1$ — коэффициент испарения, величина обратная коэффициенту увлажнения (K_y); $h_{\text{пр.б}}/P = \alpha_2$ — коэффициент стока в случае равенства осадков выпавших на поверхность озера и водосбора. Тогда:

$$Y = 1 - \frac{\alpha_1}{\alpha_2 K + 1}. \quad (9)$$

Уравнение (9) описывает гиперболу. При этом аргументами процесса являются величины удельного водосбора (K), который изменяется от 0 до ∞ ($0 < K < \infty$), коэффициент стока ($0 < \alpha_2 < 1$) и коэффициент испарения (α_1), характеризующий географическую зону или местоположение водоема (величины α_2 и соответствующие им географические зоны приведены в подрисуночной подписи на рис. 1). Решение уравнения (9) при разных аргументах и трех крайних их значениях выполнено согласно [8], что позволило получить семейство гипербол с закрепленными концами, характеризующих

изменение доли речного стока в расходной части баланса в зависимости от величин K , α_1 и α_2 . При этом величины $\alpha_2 = f(\alpha_1)$ [17]. Их можно также заменить значениями модуля (q) или слоя (h) стока, для которых имеются карты распределения по территории обоих показателей.

Так как уравнение (9) представляет собой дробно-линейную функцию и является дополнительным, то вторые составляющие баланса, в данном случае испарение, также будут описываться уравнением гиперболы, но имеющей обратные знаки.

На рис. 1, как пример, представлено семейство таких гипербол. Из рис. 1 также следует, что при $\alpha_1 = 1,0$ гипербола служит границей, выше которой располагаются озера зоны избыточного увлажнения, ниже — недостаточного. В первом случае все водоемы должны быть сточными. Во втором — наличие стока определяется величиной второго аргумента — удельным водосбором (K), т.е. строением озерной системы. Заметную роль здесь играют климатические характеристики, выраженные через тип увлажнения территории или норму стока (\tilde{q}) — среднюю для всей озерной системы. Величина стока из озера в этом случае определяется значениями K . Чем больше удельный водосбор, тем больше сток при прочих равных условиях. При одинаковых для разных озер K возрастание стока из озера будет определяться увеличением увлажнения территории. Это, в свою очередь, приведет к уменьшению доли испарения с поверхности озера. Пересечение кривых с осью ординат при $K = 0$ говорит о том, что, даже не имея водосбора, озеро будет сточным. Пересечение кривых с осью абсцисс — озеро становится бессточным при величине удельного водосбора, соответствующего месту пересечения.

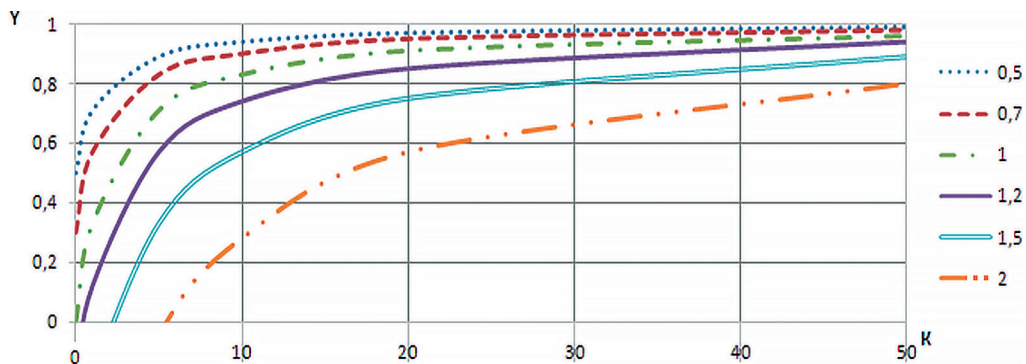


Рис. 1. Виды гипербол характеризующих изменение доли стока в расходной части водного баланса от определяющих факторов. Вид кривых и соответствующие им величины α_1 соответствуют зонам увлажнения (P/E_0) [17] представленных на рис. 2:

$K_{yb} > 1,3$ ($< 0,8$) — зона избыточного увлажнения; $1,3-1,0$ ($0,8-1,0$) — достаточного; $1,0-0,75$ ($1,0-1,33$) — переменного; $0,75-0,65$ ($1,33-1,54$) — недостаточного; $> 1,54$ — аридного

К сожалению, приведенные кривые не могут быть использованы для анализа водного баланса малых термокарстовых озер, так как условия формирования их баланса иные, чем у других типов исследуемых водоемов [4, 12, 14, 16].

Разделение территории Якутии на физико-географические зоны, характеризующиеся разной степенью увлажнения, приведено на карте (рис. 2). Количественное

выражение степени увлажнения оценено с помощью индекса увлажнения (K_y) представляющего отношение атмосферных осадков (P) к испаряемости (E_0).

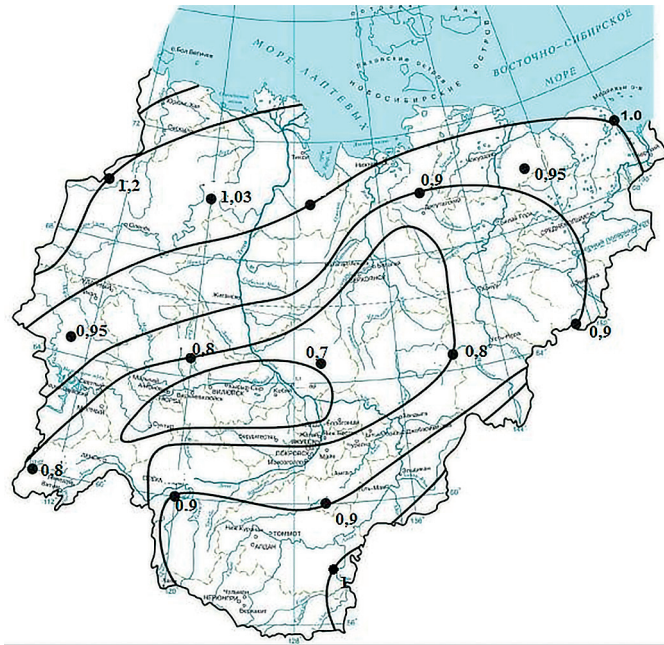


Рис. 2 Схематическая карта распределения индексов увлажнения Якутии. Зона избыточного увлажнения ($K_y > 1,3$), достаточного (1,3–1,0), переменного (1,0–0,75), недостаточного (0,75–0,65), аридного ($< 0,65$)

Из рисунка следует, что для рассматриваемой территории характерны все виды увлажнения. Большое место отведено зоне переменного увлажнения. Граница этой зоны ($K_{увл} = 1,0$) и является указанной на рис. 1 зоной раздела недостаточного и достаточного увлажнения. Центральная часть Якутии представляет собой зону недостаточного увлажнения. Зоны избыточного и достаточного увлажнения занимают северо-западную, северную и восточную части территории. В центральной ее части на небольшой площади заметны признаки, характеризующие зону аридного увлажнения.

Подобным образом можно рассчитать вариант соотношения приходных элементов водного баланса ($h_{пр}, P$). Чем больше K , тем выше доля притока воды с водосбора озера и ниже доля осадков на поверхность озера. И, наоборот, чем больше увлажненность территории при одинаковых K , тем выше приток с бассейна. Предлагаемый график позволяет оценить степень влияния приходных и расходных составляющих водного баланса на соотношение аллохтонных или автохтонных процессов, происходящих в озере. Этот график представляет несомненный интерес при решении поставленной в работе задачи и связанной с анализом транзитно-аккумуляционных свойств озер Якутии. Рассчитанные многолетние балансы разнотипных озер Якутии и соотношение элементов

баланса соответствуют выведенным закономерностям. Приведенные уравнения и графики помимо раскрытия причин, определяющих структуру водного баланса, дают возможность определить соотношение элементов для неизученных, слабо изученных или вновь создаваемых объектов. Кроме того, они позволяют контролировать имеющиеся водные балансы за многолетний период. Эти уравнения и графики могут быть полезными при оценке новой структуры баланса при возможных изменениях климата и *К*. А также при учете хозяйственной деятельности.

Распределение по территории сточных, бессточных и периодически сточных озер

Полученные зависимости, графики, позволяющие оценивать структуру водного баланса, дают возможность отнести озеро к одному из существующих воднобалансовых типов водоемов Якутии. По Б.Б. Богословскому [3], все озера можно разделить на 2 группы, различающиеся соотношением элементов баланса: стоковые ($h_{ст} > P$) и испаряющие ($h_{ст} < E$). Каждая из групп делится на 2 типа (табл. 2). При этом в качестве примеров приведены озера Якутии, по которым рассчитаны водные балансы.

Таблица 2

Классификация водоемов суши по структуре водного баланса (по Б.Б. Богословскому)

| Группа | Тип | Водоем |
|--------------------------------|---|--|
| Стоковые (с) $h_{ст} > E$ | Стоково-приточные (сп) $h_{пр} > P$ | Ладаннаах, Мелкое, Лабынкыр, Ожогоино, Сутуруоха, Большое и Малое Токо, озерно-речные системы приморской низменности, проточные, ледниковые озера Восточной, Южной Якутии. |
| | Стоково-дождевые (сд) $h_{пр} < P$ | Крупные, проточные озера эрозивно-термокарстового происхождения Центральной Якутии Ниджили, Быранаталаах, Белое, Муосааны. |
| Испаряющие (и) $h_{ст} < E$ | Испарительно-приточные (ип) $h_{пр} > P$ | Озера Центральной Якутии имеющие временные притоки, такие как Мюрю, Бырама, Тюнглюлю, Чапчылган, периодически сточные озера. |
| | Испарительно-дождевые (ид) $h_{пр} < P$ | Термокарстовые, аласные озера. Не имеющие стока и притока бессточные термокарстовые озера. |

На территории Якутии имеются все группы и типы озер. Перечисленные воднобалансовые типы проще представить как озера сточные, бессточные, а с учетом меняющегося климата, иногда можно выделить еще и промежуточный тип — периодически сточные. Согласно рис. 2 в Якутии чаще всего должны встречаться сточные и периодически сточные озера, а в ее центральной части — бессточные. Преобразуем уравнение водного баланса (2) с учетом (6) при $\Delta H = 0$. Тогда:

$$h_{пр}K + P - h_{ст} - E = 0. \tag{10}$$

Решая уравнение водного баланса бессточного озера ($h_{ст} = 0$) относительно *K* имеем:

$$K_{\text{кр}} = \frac{(E - P)}{h_{\text{пр}}}, \quad (11)$$

где $K_{\text{кр}}$ — критическое значение удельного водосбора, при котором озеро становится бессточным.

Если фактическое K некоего исследуемого озера больше $K_{\text{кр}}$, то рассчитанное по формуле (11) озеро является сточным, иначе — бессточным. Из этого уравнения также следует, что $K_{\text{кр}}$ должно убывать с увеличением степени увлаженности территории и увеличиваться с ее уменьшением. При этом возможно достижение $K_{\text{кр}} = 0$, которое является границей раздела между сточными озерами и при определенных условиях — бессточными. Величины $K_{\text{кр}}$, определяемые через E, P, h , можно картировать, так как перечисленные элементы зональны. Подобные карты для России в целом и в том числе для Якутии построены [7].

Для построения карты распределения по территории Якутии сточных, бессточных и периодически сточных озер привлечены карты распределения многолетних величин атмосферных осадков, испарения с поверхности водоемов и величин речного стока. Расчет $K_{\text{кр}}$ выполнен по формуле (11).

Анализ распределения $K_{\text{кр}}$ показал, что граница распространения бессточных озер оконтуривает центральную часть территории Якутии. Внутри этой зоны, относящейся к засушливой (рис. 2), возможно появление сточных озер при очень больших K . Район, относящийся к низовьям Яны, Индигирки и Колымы, вероятнее всего, следует отнести к районам с озерами периодически сточными, так как разница $E - P$ («видимое испарение») для всей этой территории близка к 0 и незначительное изменение климата (E, P) может привести к смене знака этой разницы. На остальной территории озера, как правило, сточные.

Отсутствие стока из озер центральной Якутии в ряде случаев предопределяет наличие в них воды с повышенной минерализацией. К таким объектам относятся Кемпендяйские и Абалахские озера (Большой и Малый Рассол, Тус-Кель и др.), расположенные на Ленско-Вилуйской равнине. Кроме фактора отсутствия стока накопление солей происходит за счет подземных соляных источников из толщи палеозойских отложений [6].

Приведенная в [7] карта распределения $K_{\text{кр}}$ может служить основой для исследования и определения размещения по территории озер с разными транзитно-аккумуляционными возможностями. Карта также показывает размещение по территории воднобалансовых типов озер в условиях современного климата. Зная физическую сущность коэффициента $K_{\text{кр}}$ и закономерности его распределения по территории, можно также оценить распределение типов озер при разных климатических сценариях.

Внешний водообмен разнотипных озер Якутии

Физическая сущность внешнего водообмена водоемов. Одной из главных задач при изучении озер является разработка способов оценки времени пребывания воды в котловинах или, иначе, оценка интенсивности водообмена. В качестве количественной характеристики, отражающей этот процесс принят коэффициент условного внешнего

водообмена (K_b), определяемого в зависимости от задач за многолетний или любой другой период времени. Интерес также представляют изменения этого коэффициента по территории.

Вопросам изучения процесса водообмена и разработке способов его определения посвящено большое количество исследований начиная с капитальных работ С.В. Григорьева [5], С.Д. Муравейского [13], позже Б.Б. Богословского [3], К.К. Эдельштейна [20] и др. Большой вклад в развитие изучения водообмена внес Б.Б. Богословский. При этом необходимо различать водообмен внутренний и внешний. Внутренний происходит в самих водных объектах и представляет собой процесс выравнивания физико-химических свойств водных масс. Внешний водообмен — поступление водных масс извне и выход их за пределы водоема. Количество воды, участвующее во внешнем водообмене, характеризуется водным балансом объекта.

Количественная оценка внешнего водообмена при наличии необходимых исходных данных, т.е. результатов измерений, не представляет труда. Значительно сложнее определить интенсивность водообмена для неизученных объектов. И это одна из важных задач гидрологии вообще и в наших исследованиях. Для озер Якутии такие исследования практически не проводились. Поэтому разрабатываемая методика определения K_b для этой территории актуальна. Для определения K_b необходимо определить площади озера и его водосбора по картам или спутниковым данным. Зная тип водоема с помощью формул, приведенных в табл. 1, можно определить объем озера и, привлекая карту стока, вычислить приток воды в озеро. Определение стока из озера осуществляется путем решения уравнения водного баланса (1) относительно $V_{ст}$.

Знание интенсивности водообмена, его изменчивости во времени позволяет решить целый ряд важных гидрологических задач. От интенсивности водообмена, определяемого величиной K'_b зависит уровенный режим водоемов. Чем более замедлен водообмен, тем интенсивнее происходит накопление воды, что приводит к увеличению амплитуды колебаний уровней.

Решая уравнение солевого баланса, которое определяется водным балансом, можно определить солеобмен водоемов. При интенсивном водообмене доминирует транзит веществ, поступающих с водосбора через водоем. При замедленном водообмене — аккумуляция веществ в водоеме. Таким образом, величина K''_b определяет развитие внутренних процессов и прежде всего способов удерживать поступающие с водосбора различные вещества, в том числе эвтрофирующие и продукты эрозии и абразии. Эти вещества влияют как на эволюционные процессы изменения самой котловины за счет седиментации, так и на формирование физико-химических свойств воды.

В практике гидрологических расчетов и анализа рассматриваются два вида внешнего водообмена: по притоку (K'_b) и по стоку (K''_b). Эти коэффициенты могут быть определены из уравнения водного баланса, представленного основными составляющими (1). В зависимости от решаемой задачи коэффициенты K_b определяются как частное от деления суммы приходных или расходных составляющих водного баланса на объем воды в озере (V_o). Однако чаще всего, при оценке внутриводоемных процессов рассчитываются коэффициенты водообмена лишь по притоку или стоку.

$$K'_b = \frac{V_{пр}}{V_o}, \quad K''_b = \frac{V_{ст}}{V_o}, \quad (12)$$

где $V_{пр}$ и $V_{ст}$ — соответственно приток воды в озеро и сток из озера; V_o — объем воды в озере.

Транзит и аккумуляция веществ. Коэффициент $K'_в$ раскрывает связь озера с водосбором. Транзитно-аккумуляционные свойства озера характеризуются величиной коэффициента $K''_в$. Чем больше значение этого коэффициента, тем интенсивнее происходит транзит веществ поступивших в озеро с водосбора, тем меньше их задерживается в котловине. Между транзитными и аккумуляционными процессами можно выделить промежуточные транзитно-аккумуляционные и аккумуляционно-транзитные. Наличие такого большого разброса значений $K''_в$ позволили Б.Б. Богословскому [3] классифицировать озера по интенсивности внешнего водообмена (табл. 3) В таблице впервые приведены данные по озерам Якутии.

Таблица 3

Классификация водоемов суши по внешнему водообмену (по Б.Б. Богословскому)

| Класс | Водные объекты | Водообмен | | Водоём |
|---------------------------|---|-----------------|---------------------|---|
| | | $K'_в$ | Период времени | |
| Транзитные | Участки рек, малые водохранилища | От 100 до > 300 | Часы, сутки | Не изучены |
| Транзитно-аккумуляционные | Сильно проточные и проточные озера и водохранилища | 10–100 | Недели, месяцы | Вилюйское вдхр. |
| Аккумуляционно-транзитные | Средне и слабо проточные озера и водохранилища | 1–10 | Месяцы, сезоны, год | оз. Б. Токо, оз. Лабынкыр, оз. Ладаннах, оз. Ожогино, оз. Сутуруоха. Озерно-речные системы приморской низменности |
| Аккумуляционные | а) Озера и водохранилища с замедленным водообменом | От 0,1 до 1 | Годы, десятки лет | Сточные озера центральной Якутии, в частности, оз. Ниджили, оз. Балыктаах, оз. Мюрю, оз. Тюнгулю |
| | б) Сточные и бессточные озера с малым и исключительно малым водообменом | От < 0,1 до 0 | Десятки, сотни лет | Непроточные, аласные термокарстовые озера центральной Якутии |

Приведённая классификация и принципы её построения имеют многоцелевое значение, в том числе для комплексной типизации континентальных водоёмов по их ведущим признакам, определяющим гидрологический и биологический режим озёр и водохранилищ, а также их лимнический тип.

В табл. 3 представлены 4 основных типа озера по внешнему водообмену, различающихся интенсивностью этого процесса. Водный режим класса транзитных озера приближается к речному и практически все поступившие в озеро вещества выносятся

за его пределы. Качество воды озера приближается к речному. Транзитно-аккумуляционный класс озер характеризуется сменой воды в течение недель – месяцев, а небольшая часть поступивших в озеро веществ задерживается в котловине. При аккумуляционно-транзитном режиме в зависимости от уменьшения величин K_b происходит увеличение аккумуляционной составляющей, а обмен воды растягивается на десятки лет. Класс аккумуляционных озер — это прежде всего бессточные водоемы. И основной обмен воды происходит через испарение (рис. 1). Все поступающие в озеро вещества откладываются в котловине. Именно вода озер этого класса чаще всего имеет повышенную минерализацию. При этом расчет транзита и аккумуляции веществ автором таблицы оценивается через величину K_b'' . Предварительные расчеты показали, что на территории Якутии могут быть озера всех перечисленных в табл. 3. Тем не менее, можно предположить, что большинство озер Якутии относится к классу транзитно-аккумуляционных.

Заключение

Оценка интенсивности внешнего водообмена озер имеет большое значение при хозяйственном использовании водоемов и при различных научных исследованиях. Особую актуальность приобретают разработки способов оценки водообмена неизученных объектов. Представленные результаты дают возможность увидеть пути решения этой задачи для водоемов Якутии и оценить первые результаты.

Литература

1. *Аржакова С.К., Жирков И.И., Кусатов К.И., Андросов И.М.* Реки и озёра Якутии. — Якутск: Бичик, 2007. — 133 с.
2. Атлас сельского хозяйства Якутской АССР. Главное управление геодезии и картографии при совете министров СССР. — М., 1989. — 115 с.
3. *Богословский Б.Б.* О водообмене и водных массах водных объектов. В книге «Круговороты вещества и энергии в озёрных водоемах». — Новосибирск: Наука (сиб. отдел), 1975, с. 270–275.
4. *Босиков Н.П.* Эволюция аласов центральной Якутии. — Якутск, 1991. — 242 с.
5. *Григорьев С.В.* О некоторых определениях и показателях в озероведении. // Труды Карельского филиала АН СССР, 1958, вып. 18, с. 29–45.
6. *Дзенс-Литовский А.И.* Методика комплексного исследования и разведки озёрных соляных месторождений. — Л.: Госхимиздат, 1957. — 212 с.
7. *Догановский А.М., Комаринский Д.В.* Распределение по территории озер с разной степенью проточности. // «Современные проблемы гидрометеорологии». Сборник памяти профессора В.Н. Адаменко. Под ред. проф. А.М. Догановского. — СПб., Астерион, 2006, с.185–191.
8. *Догановский А.М.* Исследование возможностей обобщения данных по водному балансу внутренних водоемов. // Сб. работ по гидрологии, 1982, № 17, с. 172–179.
9. *Жирков И.И.* Морфометрическая классификация как основа рационального использования охраны и воспроизводства природных ресурсов криолитозоны. // Вопросы рационального использования и охраны природных ресурсов разнотипных озер криолитозоны (на примере Центральной Якутии). Межвузовский сборник. — Якутск: изд. Якутского госуниверситета, 1983, с. 4–45.
10. *Комлев А.М.* Некоторые проблемы оценки ресурсов поверхностных вод. // Географический вестник ПГУ, 2005, № 1-2, с. 68–72.
11. *Кузнецов В.И.* Испарение со снежного покрова. // Труды ГГИ, 1964, вып. 109, с. 3–56.
12. *Мостахов С.Е.* Озерность бассейна р. Лены. В кн. Озера криолитозоны Сибири. — Новосибирск, Наука, 1974, с. 3–6.

13. *Муравейский С.Д.* Роль географических факторов в формировании географических комплексов. В кн. Реки и озёра. — М., 1960.
14. *Нестерева М.И.* Пространственные особенности строения разнотипных озерных котловин на территории Якутии. // Общество. Среда. Развитие, 2011, № 4, с. 227–230.
15. *Постников А.Н.* Приближённый метод оценки испарения с озёр и водохранилищ. // Учёные записки РГГМУ, 2010, № 13, с. 21–29.
16. Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 17. Лено-Индигирский район. — Л., 1972.
17. *Смирнов Н.П., Малинин В.Н.* Водный баланс атмосферы как гидрологическая задача. — Л.: изд. ЛГУ, 1988. — 200 с.
18. *Сорокин И.Н.* Внешний водообмен озёр СССР. — Л.: Наука, 1988. — 144 с.
19. *Толстихин О.Н.* О методике составления карты мерзлотного гидрогеологического районирования Восточной Сибири. // Мерзлотно гидрогеологические условия Восточной Сибири. — Новосибирск: Наука, 1984, с. 68–72.
20. *Эдельштейн К.К.* Гидрология озёр и водохранилищ. — М.: Перо, 2014. — 400 с.