

А.М. Догановский, Н.В. Мякишева

ВОДНЫЙ БАЛАНС И ВНЕШНИЙ ВОДООБМЕН ОЗЕР РОССИИ И СОПРЕДЕЛЬНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

A.M. Doganovsky, N.V. Myakisheva

WATER BALANCE AND EXTERNAL WATER EXCHANGE OF LAKES OF RUSSIA AND ADJACENT TERRITORIES

Исследованы закономерности распределения и строения батиметрически изученных озер больших территорий. Предложен способ определения структуры водного баланса для выявления основных источников питания (расхода) озерных вод. Исследования и расчеты выполнены в рамках разработки способов определения внешнего водообмена неизученных озер и их транзитно — аккумуляционных свойств.

Ключевые слова: озеро, водосбор, котловина, водный баланс, уровень, водообмен.

Patterns of distribution and structure of the bathymetrically explored lakes within large areas were studied. A method for determining the structure of the water balance for identifying the main sources of lake waters input (discharge) has been offered. The research and calculations have been made in the framework of the development of methods for determining an external water exchange and transit accumulative properties of unexplored lakes.

Key words: lake, catchment, depression, water balance, level, water exchange.

Введение

Естественные озера сосредоточены в местах, где имеются котловины и вода. Поэтому эти объекты распространены практически повсеместно, но наибольшие их скопления приурочены к областям древнего и современного оледенения, к районам крупных тектонических разломов земной коры и к засушливым бессточным территориям. Количественным показателем распределения озер служит коэффициент озерности (f_o). Средняя озерность для земного шара составляет 1,5 %. При этом наблюдается определенная закономерность в распределении f_o , связанная как с происхождением котловин, так и с особенностями климата. На рис. 1 приведена карта — схема озерности территории России.

Максимальное количество озер сосредоточено в зоне распространения последнего Валдайского оледенения. Здесь величины f_o достигают 12–13 %, в отдельных случаях превышая 20 %. В этом районе находятся крупнейшие озера Европы: Ладожское, Онежское, Чудско-Псковское и др. Высокая озерность наблюдается и в сопредельных районах Финляндии, Беларуси, стран Балтии. На карте также видно, что повышенная озерность (3–10 %) свойственна северным регионам, а также Западной Сибири. На остальной территории озерность меньше 2 %, за исключением области распространения бессточных озер засушливых территорий Забайкалья, юга Западной Сибири,

сопредельной территории Казахстана, где величины f_0 возрастают до 3–5 %. Здесь же расположены такие крупные озера, как Балхаш, Б. Чаны, Кулундинское и др. Все бессточные озера, как правило, имеют повышенную минерализацию.

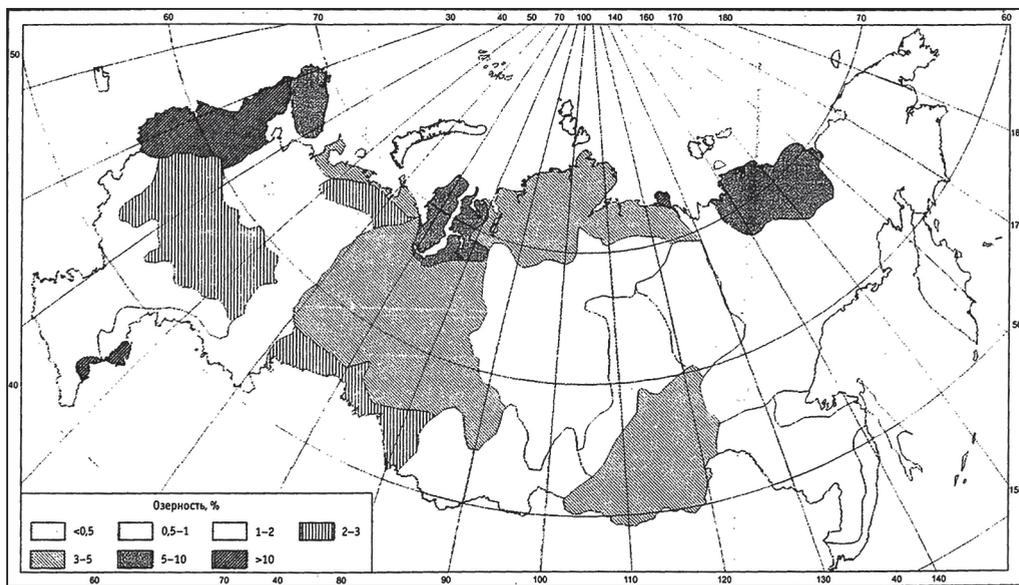


Рис. 1. Озерность территории Российской Федерации

Весьма условно, но можно говорить о наличии северного и южного озерных поясов. Подобная закономерность наблюдается и в западном полушарии. Распределение озер России по градациям их площадей приведено в табл. 1.

Таблица 1

Озёра России по градациям площади зеркала

Площадь зеркала, км ²	Количество озёр			Суммарная площадь зеркала, км ²
	ЕТР	АТР	Россия в целом	
1–10	4830	28 370	33 200	76 940
10–50	429	1 274	1 703	32 790
50–100	38	125	163	11 163
100–1000	20	69	89	20 924
> 1000	4	4	8	74 020
Всего	5 321	29 842	35 163	215 837

Самое крупное озеро на территории нашей страны и в мире — Каспийское море имеет площадь зеркала 390 000 км² и запасы воды 78 200 км³. Озеро Байкал самое глубокое озеро Земли, а запасы чистой пресной воды составляют 23 615 км³. Озера

с площадью зеркала менее 1 км² составляют около 98 % общего их количества как в России, так и на сопредельных территориях.

Такое большое количество озер играет заметную роль в жизни континента и в хозяйственной деятельности человека. Скопления озер образуют озерные ландшафты, представляющие собой озерные комплексы, связанные со спецификой морфологии территории. Озера также являются составной частью гидрографической сети, а основная их функция — аккумуляция воды и регулирование речного стока. Кроме того озера участвуют в формировании гидрологического режима других водных объектов и в первую очередь рек. Так, большая часть 2,5 млн рек и 2,5 млн озер России в той или иной степени связаны друг с другом. При этом водные ресурсы озер во много раз превосходят ресурсы рек (соответственно 180 000 и 2 150 км³). Использование озер в хозяйственных целях весьма разнообразно и связано с типом водоема. Так, бессточные озера являются водоприемниками — накопителями солей, которые широко используются в галургии. Также озера служат источниками водоснабжения и орошения полей. Большей частью крупные озера, озерно-речные системы являются водными путями. В случае создания плотин на вытекающих из озер реках эти объекты становятся водохранилищами ГЭС. Озера также широко используются для рыболовства и рыбоводства, как объекты рекреации, водоемы-охладители ГРЭС и АЭС, добычи сапропеля, для целей бальнеологии и т.п.

В настоящее время на кафедре гидрологии суши РГГМУ значительно возрос интерес к научным исследованиям в области гидрологии озер и водохранилищ. Здесь следует отдать должное профессору Б.Б. Богословскому — известному лимнологу, возглавлявшему кафедру в течение 6 лет. (В 2016 г. мы будем отмечать 100 лет со дня рождения Бориса Борисовича). Под его руководством были переработаны учебные программы, расширены научные исследования. Впервые в истории РГГМУ были защищены две докторские диссертации по гидрологии озер и водохранилищ сотрудниками кафедры (А.М. Догановский, Н.В. Мякишева), несколько кандидатских, в том числе иностранными учащимися. В настоящее время действует магистерская учебная программа по гидрологии озер и водохранилищ.

Сложившийся коллектив кафедры, работающий в области гидрологии озер и водохранилищ, в том числе студенты и аспиранты, рассматривает широкий круг научных задач. Однако наибольшее распространение получили исследования, связанные с применением балансовых методов расчета гидрологических величин для неизученных объектов. К числу главных задач также отнесены вопросы, связанные с изучением особенностей строения, а следовательно, и происхождения озерных котловин и озерных природных систем в целом (озеро и его водосбор).

Озерные системы и озерные котловины. Особенности их строения

Рассмотрено большое количество озер, расположенных в различных физико-географических условиях, различающихся геологическим строением, климатом, ландшафтами. Котловины этих водоемов имеют различное происхождение, сформированы действием разных факторов. Неодинаковые по продолжительности периоды существования озер предопределили разную степень переформирования их котловин: разрушение берегов, заиление и т.п. При определении закономерностей пространственного

распределения озерных котловин в основу предлагаемого способа положен очевидный факт, что котловины одного и того же происхождения, одинакового возраста должны иметь схожие относительные размеры. Известно, что котловины тектонического происхождения более глубокие, чем, например, ледникового, а формы котловин соответственно ближе к конусу и параболоиду. Карстовые котловины невелики по площади, но относительно глубокие, в то время как котловины эолового происхождения имеют малые глубины и т.п. Подобные сведения приведены в обобщающих работах Б.Б. Богословского [1], Р.А. Нежиховского [13], С.В. Рянжина [16], М.Я. Прытковой [15]. Имеются также данные по озерам Средней Азии, Литвы, Северо-Запада России, Казахстана, Беларуси, Южного Урала, Якутии.

Для выделения районов сосредоточения генетически однородных котловин естественных озер потребовалось подробное изучение геоморфологических, геологических особенностей больших территорий. В качестве основного аргумента выделения однородных районов принят вид зависимости объема воды в озере (V_o) от его площади (A_o). Для установления зависимостей привлечен большой исходный материал по батиметрически изученным объектам. Всего рассмотрено около 5 тыс. озер, в том числе данные из лимнологической базы WORLDLAKE, предоставленной С.В. Рянжиным. Процедура выделения однотипных районов связана с привлечением объективного метода — кластерного анализа, позволившего сгруппировать однородные по генезису котловины. На рис. 2 приведены зависимости $V_o = f(A_o)$ для отдельных однородных районов рассматриваемой территории, а в табл. 2 представлены соответствующие уравнения.

Полученные уравнения позволяют приближенно оценить объемы воды в озерах, зная их площади. Подобные зависимости установлены и для других морфометрических характеристик разнотипных озер. Например, зависимость максимальных глубин от средних, что позволяет оценить форму котловин и примерно связать ее с условиями происхождения. Для выделенных однородных районов установлены зависимости между площадями озер и размерами их водосборов (A_b) (K — удельные водосборы). При этом величины коэффициентов корреляции зависимостей $V_o = f(A_o)$ часто превышают 0,8–0,9, в то время как для $A_o = f(A_b)$ они, как правило, не выше 0,6–0,7. Подробное описание выделенных районов приведено в работах, в том числе авторов [6, 10, 11, 13, 17, 18, 21]. Таким образом, зная район расположения изучаемого объекта, его площадь, определенную по картам или с помощью ИСЗ, приближенно оценены запасы воды в озерах. В табл. 2 приведены примеры уравнений $V_o = f(A_o)$ как результат аппроксимации установленных зависимостей, в том числе представленных на рис. 2.

Таблица 2

Уравнения $V_o = f(A_o)$ для разнотипных озер

Район	Типы котловин	Формулы
СЗ РФ	ледниково-тектонические	$V = 0,0049 A_o^{1,16}$
	ледниково-аккумулятивные	$V = 0,0015 A_o^{1,14}$
Якутия	термокарстовые	$V = 0,0022 A_o^{1,11}$
	тектонические	$V = 0,0795 A_o^{2,8}$
Казахстан	флювиальные и тектонические	$V = 0,0034 A_o^{1,13}$

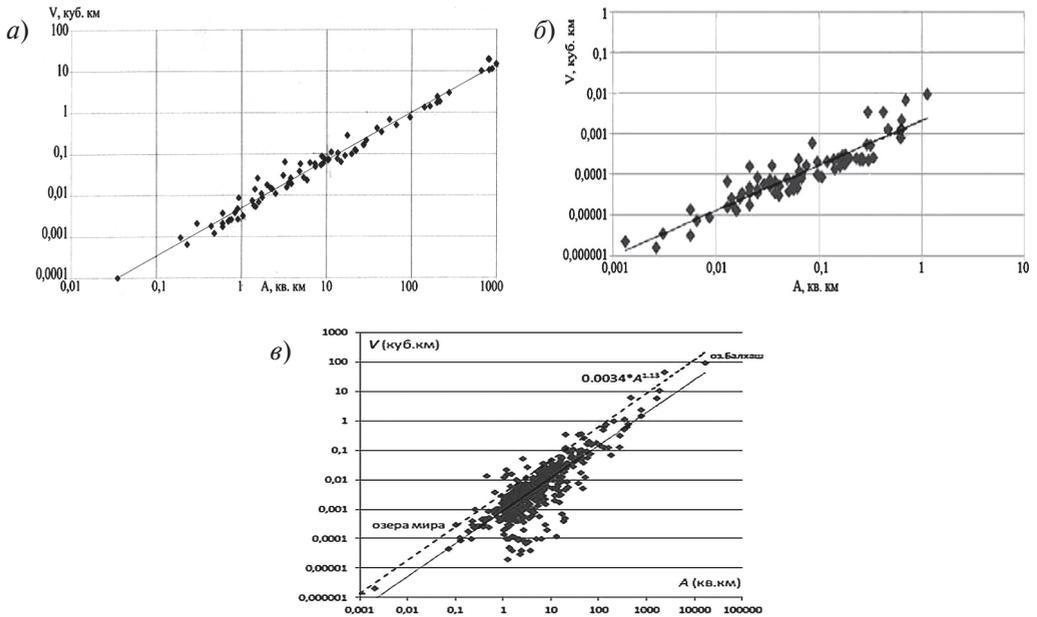


Рис. 2. Зависимости $V_0 = f(A_0)$ разнотипных озер:
 а — СЗ РФ ледниково-тектонический тип; б — Якутия термокарстовый тип;
 в - Казахстан флювиальные и тектонические типы (пунктир — озера мира [16])

Числовые параметры формул определяются физико-географическими и геологическими особенностями территорий.

Водный баланс и его структура

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 является главнейшей характеристикой гидрометеорологического режима водоемов. На основе водного баланса 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.

Интенсивность внешнего водообмена озер также 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 или какова доля стока — в расходной. При этом, как

отмечено выше, часто возникает необходимость определения баланса, его структуры при отсутствии наблюдений.

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 рассматриваемой территории 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, величина удельных водосборов, формы котловин и русел вытекающих рек и др.).

Преобладание аллохтонных или автохтонных процессов в озерах 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.

Особенности режимных характеристик озера, функционирование его экосистемы также определяется преобладающими элементами баланса. 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 %. Таким образом, структура водного баланса определяется местоположением водоема, т.е. климатом и особенностями строения 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 [8], А.М. Догановским, М.И. Нестеревой [6]. 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:

$$h_{\text{пр}} = \frac{V_{\text{пр}}}{A_0} = \frac{h_{\text{пр.б}} A_6}{A_0} = h_{\text{пр.б}} K, \quad (3)$$

где $h_{\text{пр.б}}$ — величина речного стока на водосборе (мм); A_6 — площадь водосбора; K — показатель удельного водосбора ($K = A_6/A_0$).

Доля речного стока в расходной части баланса (Y) равна:

$$Y = \frac{h_{\text{пр.б}} \cdot K + P - E}{h_{\text{пр.б}} \cdot K + A} \quad (4)$$

или, разделив числитель и знаменатель на P получим:

$$Y = 1 - \frac{E/P}{(h_{\text{пр.б}} \cdot K)/P + 1}, \quad (5)$$

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

$$Y = 1 - \frac{\alpha_1}{\alpha_2 \cdot K + 1}. \quad (6)$$

Уравнение (6) 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_1 и соответствующие им географические зоны приведены в подрисуночных подписях на рис. 1). Решение уравнения (6) при разных аргументах и трех крайних их значениях выполнено согласно [3], 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 $\alpha_2 = f(\alpha_1)$. Однако их можно заменить значениями модуля (q) или слоя (h) стока, для которых имеются карты распределения по территории обоих показателей.

Возможные варианты гипербол при разных значениях аргументов представлены на рис. 3. При этом график функции при $\alpha_1 = 1,0$ ($q = 2-3$ л/с·км²) 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 K и в меньшей мере α_2 . Многолетние колебания водности определяют неустойчивость значений α_1 и α_2 (q) и соответственно линии под номером 3 на рис. 3. Отсюда возникает класс периодически сточных озер.

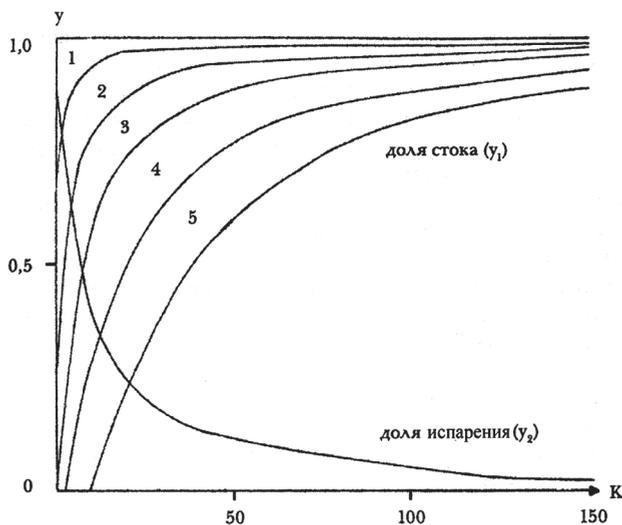


Рис. 3. Виды гипербол, характеризующих изменение доли составляющих водного баланса от определяющих факторов: y_1 — доля стока в расходной части баланса; y_2 — доля испарения; K — величина удельного водосбора; 1 — модуль стока $q = 15$ л/(с·км²); 2 — $q = 10$ л/(с·км²); 3 — $q = 2-3$ л/(с·км²); 4 — $q = 1$ л/(с·км²); 5 — $q < 1$ л/(с·км²)

Географическое распределение воднобалансовых типов озер представлено также в виде карт изолиний критических значений удельных водосборов ($K_{кр}$), выше которых озера становятся бессточными, ниже — сточными. Для определения $K_{кр}$ формул (2)–(3) получено соотношение при условии $h_{ст} = 0$.

$$K_{кр} = (E - P) / h_{пр}. \tag{7}$$

Построенные таким образом карты и их анализ приведены в работах авторов [4].

Внешний водообмен разнотипных озер

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 ($K_в$), 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 [2], С.Д. Муравейского [9], позже Б.Б. Богословского [1], И.Н. Сорокина [19], 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.

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

$$K'_в = V_{пр}/V_о, \quad K''_в = V_{ст}/V_о, \quad (8)$$

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

Количественная оценка внешнего водообмена при наличии необходимых исходных данных, т.е. результатов измерений, не представляет труда. Значительно сложнее определить интенсивность водообмена для неизученных объектов, а это основная задача наших исследований. Для определения $K'_в$ неизученных объектов необходимо определить площади озера и его водосбора по картам или спутниковым данным. Зная тип водоема, с помощью формул приведенных в наших работах [6, 16], а примеры их представлены в табл. 1, следует определить объем воды в озере и, привлекая карту стока, вычислить приток воды в этот водоем. 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 и гидроэкологических задач. От интенсивности водообмена, определяемого величиной $K'_в$ зависит уреченный режим водоемов. Чем более замедлен водообмен, тем интенсивнее происходит накопление воды, что приводит к увеличению амплитуды колебаний уровней и возрастанию внутрирядной связанности рядов. То есть от $K'_в$ зависят параметры кривых распределения уреченных рядов. С увеличением интенсивности водообмена уменьшается биомасса планктонных сообществ, меняется тип лимногенеза.

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 $K''_в$ 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.

Коэффициент K'_b раскрывает связь озера с водосбором. Транзитно-аккумуляционные свойства озера характеризуются величиной коэффициента K''_b . 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''_b позволили Б.Б. Богословскому [1] классифицировать озера по интенсивности внешнего водообмена. Эта классификация с нашими небольшими изменениями приведена в табл. 3.

Таблица 3

Классификация водоемов по внешнему водообмену

Класс	Транзитные	Транзитно-аккумуляционные	Аккумуляционно-транзитные			Аккумуляционные озера
	сильно проточные		среднепроточные озера	слабая проточность	крупные озера	бессточные
водообмен K''_b	>100	10–100	1–10	0,1–10	< 0,1	0
период обмена τ	часы, сутки	недели, месяцы	месяцы, сезоны, годы	годы, десятилетия	десятки и сотни лет	–

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 основные типы озёр, по внешнему водообмену различающихся интенсивностью этого процесса. Водный режим класса транзитных озёр приближается к речному и практически все поступившие в озеро вещества выносятся за его пределы. Качество воды озера приближается к речному. Транзитно-аккумуляционный класс озёр 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. К классу аккумуляционно транзитных водоемов можно также отнести крупные озера с коэффициентом водообмена менее 0,1, где накопление веществ растягивается на десятки и сотни лет. Класс аккумуляционных озёр — это, прежде всего, бессточные водоемы. Основной обмен воды происходит через испарение (рис. 1), а все поступающие в озеро вещества откладываются в котловине. Именно вода озёр этого класса чаще всего имеет повышенную минерализацию. При этом расчет транзита и аккумуляции веществ оценивается через величину K''_b .

Расчеты показали, что на рассматриваемой территории имеются озера всех перечисленных в таблице классов. Однако разные типы увлажнения территорий, неодинаковые геоморфологические условия предопределили неравномерное

распределение озер разных типов. Так большинство озер Северо-Запада России относятся к классу транзитно-аккумуляционных. Среди озер Якутии также много транзитно-аккумуляционных объектов, но в центральной ее части подавляющее большинство озер — аккумуляционные. Большинство озер Северного Казахстана относятся к классам флювиальных, аккумуляционных, тектонических.

Многокритериальная классификация озёр

Существующие многочисленные классификации озер, как правило, являются одномерными и частными. Они выполнены по одному из характерных признаков для решения конкретных задач. Однако они не исключают создание многомерных классификаций как основы для более прочного обоснования одномерных и их согласования между собой. Исходя из того, что наиболее долго вода задерживается в океане (водообмен 1 раз в 2500 лет), а наиболее быстрая смена воды характерна для рек (часы, сутки). Водообмен озер занимает промежуточное положение между этими крайними показателями. На основании учета основных факторов, одновременно влияющих на интенсивность водообмена озёр (морфометрических, климатических), разработана классификация озер по величине внешнего водообмена [5, 10, 11].

В свою очередь, классы оказалось возможным разделить на подклассы, определяемые в первую очередь размерами водоемов (малые, средние, большие) и особенностями их морфометрических характеристик (табл. 5).

Таблица 4

Классы озер по величине их внешнего водообмена

№ п/п	Класс	Значение в год	Период водообмена
1	Слабый	От 0,00025 до 0,1	От 1 раза в 2,5 тыс. лет до 1 раза в 10 лет
2	Умеренный	От 0,1 до 1,00	От 1 раза в 10 лет до 1 раза в год
3	Умерено-сильный	От 1,0 до 4,0	От 1 раза в год до 1 раза в сезон
4	Сильный	От 4,0 до 12,0	От 1 раза в сезон до 1 раза в месяц
5	Очень сильный	От 12,0 до 365,0	От 1 раза в месяц до 1 раза в сутки

Таблица 5

Многомерные классы озерных систем

Морфометрические характеристики	Подклассы		
	малые	средние	большие
слабый водообмен ($K_B < 0,1$)			
K	1–5	1–10	1–10
$A_{\text{васб}}, \text{км}^2$	10–100	100–500	500–5000
$V, \text{км}^3$	0,10–1,0	1,0–10,0	>10,0
умеренный водообмен ($0,1 < K_B < 1,0$)			
K	1–25	1–25	1–25

Морфометрические характеристики	Подклассы		
	малые	средние	большие
$A_{\text{васб}}, \text{км}^2$	10–100	100–500	500–5000
$V, \text{км}^3$	0,01–0,10	0,10–1,0	1,0–10,0
умеренно-сильный водообмен ($1,0 < K_B < 4,0$)			
K	1–25	1–25; 25–50; >50	>50
$A_{\text{васб}}, \text{км}^2$	10–100	100–500	500–5000
$V, \text{км}^3$	0,001–0,01	0,01–0,1	0,1–1,0
сильный водообмен ($4,0 < K_B$)			
K	1–25	1–25; 25–75; >75	50–75; 75–150; >150
$A_{\text{васб}}, \text{км}^2$	10–100	100–500	500–5000
$V, \text{км}^3$	0,001	0,001–0,01	0,01–0,10

В распределении по территории озер с разным водообменом прослеживается определенная географическая закономерность. На рис. 4 представлено районирование Северо-Запада России, одного из районов рассматриваемой территории по величине комплексного индекса внешнего водообмена, обозначаемого как WEE (*water exterior exchange*). Этот индекс в явном виде учитывает влияние на водообмен морфометрических особенностей подстилающей поверхности и климатических факторов. Этапы построения указанного индекса и подробное описание выделенных районов изложено в нашей работе [5].

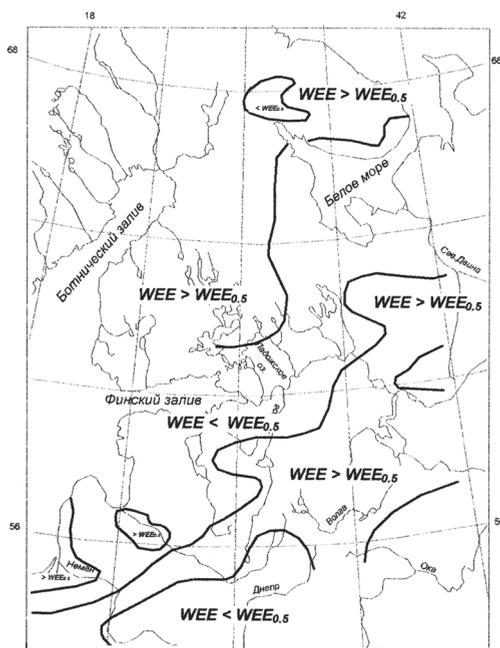


Рис. 4. Пространственное распределение индексов WEE , $WEE_{0,5}$ — медианы функций распределения $F(WEE)$

Анализ представленной карты и выделенные районы соответствуют известной схеме распределения озер Северо-Запада России Д.Д. Квасова [14]. При этом обращает на себя внимание закономерность ориентации границ районов, связанная с движением последнего Валдайского ледника.

Литература

1. *Богословский Б.Б.* О водообмене водоемов и водных массах водных объектов. Круговорот вещества и энергии в озерных водоемах. — Новосибирск: Наука, 1975, с. 270–275.
2. *Григорьев С.В.* О некоторых определениях и показателях в озероведении. // Труды Карельского филиала АН СССР, Материалы по гидрологии, Карелия, Петрозаводск, 1959, вып. 18, с. 29–45.
3. *Догановский А.М.* Исследование возможностей обобщения данных по водному балансу внутренних водоемов. // Сб. работ по гидрологии, 1982, № 17, с. 172–179.
4. *Догановский А.М., Комаринский Д.В.* Распределение по территории озер с разной степенью проточности. В сб.: Современные проблемы гидрометеорологии (Сборник посвящен памяти профессора В.Н.Адаменко). — СПб.: изд. «Астерион», 2006, с. 184–191.
5. *Догановский А.М., Мякишева Н.В.* Построение комплексных индексов внешнего водообмена озер в условиях неопределенности и дефицита гидрологической информации. // Водные ресурсы, 2002, т. 29, № 3, с. 284–291.
6. *Догановский А.М., Нестерева М.И.* Водный баланс и внешний водообмен озер Якутии. // Учёные записки РГГМУ, 2015, № 40, с. 15–30.
7. *Драбкова В.Г., И.Н.Сорокин.* Озеро и его водосбор — единая природная система. — Л.: «Наука», 1979. — 196 с.
8. *Комлев А.М.* Некоторые проблемы оценки ресурсов поверхностных вод. // Географический вестник, 2005, № 1–2, с. 68–72.
9. *Муравейский С.Д.* Очерки по теории и методам морфометрии озер. // Вопросы географии, 1948, № 7.
10. *Мякишева Н.В.* Классификация озер при информационном дефиците. — Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2011. — 195 с.
11. *Мякишева Н.В.* Многокритериальная классификация озер. — СПб.: Гидрометеоиздат, 2009. — 153 с.
12. *Мякишева Н.В. Жумангалиева З.М.* Внешний водообмен озер зоны недостаточного увлажнения. // Учёные записки РГГМУ, 2013, № 27, с. 36–44.
13. *Нежиховский Р.А.* Объем воды в реках, озерах и водохранилищах Советского Союза. // Труды ГГИ, 1973, вып. 203, с. 239–242.
14. Последний ледниковый покров на Северо-Западе Европейской части СССР. Под ред. И.П. Герасимова. — М.: «Наука», 1969. — 322 с.
15. *Прыткова М.Я.* Гидрологический режим и заиление малых разнотипных водоемов Северо-Запада. — СПб.: «Наука», 2011. — 200 с.
16. *Рянжин С.В.* Новые оценки глобальной площади и объема воды естественных озер мира. // Докл. РАН, 2005, т. 401, № 2, с. 253–257.
17. *Рянжин С.В., Мякишева Н.В., Жумангалиева З.М.* Морфометрические и гидрохимические характеристики озер Казахстана. // Водные ресурсы, 2015, т. 42, № 5, с. 510–521.
18. *Сало Ю.А., Потахин М.С., Толстиков А.В.* Расчет средней глубины озер при отсутствии батиметрических данных на примере водоемов Карелии. География: Проблемы науки и образования, LXIII Герценовские чтения. — СПб., 2010, с. 410–413.
19. *Сорокин И.Н.* Внешний водообмен озер СССР. — Л.: «Наука», 1988. — 180 с.
20. *Эдельштейн К.К.* Гидрология озер и водохранилищ. — М.: изд. «Перо», 2014. — 399 с.
21. *Doganovsky A.M.* External water exchange of lakes as the integral indicator of water body types. // Polish Limnological society, Limnological review, 2012, vol. 12, № 1, p. 11–17.