

Методы оценки внешнего водообмена водохранилищ

А.Б. Китаев

Интенсивность водообмена является важнейшей характеристикой экосистемы любого объекта, в том числе и искусственных водоемов, каковыми являются водохранилища. По мнению К.К. Эдельштейна [44], водообмен представляет собой сочетание многообразных динамических процессов, одновременно протекающих в водоеме под действием на воду различных внешних сил, ее вязкости и инерции.

В настоящее время принято деление водообмена на внешний и внутренний. *Внешний водообмен* определяется компонентами водного баланса и обозначается заменой вод, находящихся в водоеме, новыми водами, поступившими извне. *При внутреннем водообмене* происходит перемещение и смешение водных масс в самом водоеме. Он может быть связан как с внешним водообменом и водным балансом, так и с перемешиванием – горизонтальным и вертикальным турбулентным обменом. В первом случае фактором, определяющим водообмен, являются стоковые течения, во втором случае турбулентное перемешивание происходит при волнах и течениях (как стоковых, так и ветровых).

Внешний водообмен любого проточного водоема, по мнению В.А. Знаменского [16], обусловлен проявлением четырех гидрологических процессов:

- поступление воды поверхностным и подземным путем и в виде атмосферных осадков;
- временная аккумуляция воды в водоеме;
- отток воды в другую водную систему;
- испарение воды с водной поверхности водоема.

Эти процессы зависят в свою очередь от совокупности гидрометеорологических явлений, происходящих на водосборном бассейне над водоемом и в его водной массе.

Внешний водообмен имеет горизонтальную и вертикальную составляющие. Первая включает приток воды в водоем и сток из него. Одна из вертикальных составляющих внешнего водообмена включает выпадение атмосферных осадков на водную поверхность, конденсацию влаги на акватории водоема и испарение с нее, т.е. водообмен через поверхность двух сред – воды и воздуха. Другая вертикальная составляющая – это водообмен через границу вода – дно. Физические и химические особенности процесса обмена водоема с внешней средой на граничных поверхностях определяют различия в той роли, которую играют горизонтальная и вертикальная составляющие в трансформации химического состава речного стока. С увеличением интенсивности вертикальных составляющих внешнего водообмена усиливается трансформация химического состава воды, ее физических свойств (температура, плотность), с увеличением горизонтальной составляющей обмена трансформация стока ослабевает [44].

Внешний водообмен определяется степенью участия водоема в глобальном гидрологическом цикле и состоит в обмене водой с соседними участками гидрографической сети, грунтами ложа и атмосферой. Это составная часть более общего процесса массо- и энергообмена с окружающей средой. Соотношение интенсивности составляющих внешнего водообмена, т.е. структура водного баланса, зависит от морфометрических параметров водоема, его географического положения и места в гидрографической сети. В отличие от озер горизонтальная составляющая внешнего водообмена водохра-

нилищ – управляемый в ограниченных пределах процесс сброса воды через гидроузел, определяющий специфику водного режима техногенных водоемов: в многоводные фазы стока интенсивность горизонтального обмена уменьшается с целью накопления воды в полезном объеме водохранилища, в маловодные – увеличивается путем ее сработки. Регулируя стока, гидроузел управляет в большей или меньшей степени всей структурой водного баланса водохранилища, определяя одновременно с величиной стока изменение запаса воды и площади акватории, размер которой влияет на вертикальный обмен с атмосферой и литосферой.

Изучение водообмена способствовало разработке надежных методов расчета количественных показателей интенсивности этого процесса. Швейцарский географ Ф.Форель в начале 20-го столетия впервые оценил среднюю продолжительность пребывания воды в озере отношением среднего объема воды в водоеме к объему стока из него за некоторый период. В России интенсивность обмена вод в озерах аналогичным показателям впервые была оценена в 1955 г. Б.Б. Богословским и С.Д. Муравейским [2].

Первый показатель, оценивающий интенсивность внешнего водообмена в водохранилищах, был предложен в 1958 г. Л.И.Дубровиным [10]. Он был назван автором коэффициентом проточности, который показывал, сколько раз или какая часть водной массы обменивается за определенный промежуток времени, т.е.

$$D = \frac{W_{ст.ГЭС}}{V}, \quad (1)$$

где $W_{ст.гэс}$ —объем сброса воды в нижний бьеф, V —объем водохранилища.

В 1959 г. С.В. Григорьевым [8] был предложен показатель условного водообмена сточных водоемов, равный отношению объема притока в водоем за некоторый промежуток времени ($W_{пр}$) к среднему для этого промежутка времени объему воды водоема (W):

$$D = \frac{W_{пр}}{V}, \quad (2)$$

Н.В. Буторин в 1965 г. [6] для характеристики интенсивности внешнего водообмена в искусственных водоемах дал показатель вида

$$D = \frac{W_{б}}{V}, \quad (3)$$

где $W_{б}$ —объем всех вод, участвующих во внешнем водообмене (атмосферные осадки, приток с бассейна, сток из водоема, испарение с водной поверхности).

К.А. Бакулин (1968) при оценке водообмена водохранилищ, помимо коэффициента условного водообмена по С.В. Григорьеву, приводит некоторый показатель, который, по его мнению, также характеризует интенсивность обмена вод в водоеме:

$$\frac{1}{\alpha_{вод}} = \frac{V}{W_{пр}}. \quad (4)$$

Этот коэффициент обозначает число лет «средней водности», в течение которых весь объем мог бы смениться за счет притока в него в условном допущении, что весь объем водоема принимает участие в смене вод [1].

Из-за отсутствия фактических данных интегральная оценка водообмена особенно для малых водоемов, не всегда возможна. Но известно, что при постоянном объеме водоема его водообмен прямо пропорционален модулю стока. Исходя из этого, возможны расчет водообмена некоторого условного водоема, картирование этой величины и по-

следующий расчет по карте водообмена реальных водоемов с учетом их фактических размеров. Такой подход разработан С.А.Филь в 1971 г. [33].

$$D_{\text{фак}} = A \cdot D_{\text{усл}}, \quad (5)$$

где $D_{\text{фак}}$ и $D_{\text{усл}}$ – фактический и условный (снятый с карты) коэффициенты водообмена A – переходный коэффициент, учитывающий фактическую площадь водосбора (F) и отношение условного ($V_{\text{усл}}$) и фактического ($V_{\text{фак}}$) объемов водоемов, т.е.

$$A = \frac{F \cdot V_{\text{усл}}}{100 \cdot V_{\text{фак}}}. \quad (6)$$

При каскадном положении водоемов Б.Б. Богословский, В.А. Кириллова, С.А.Филь [3] предлагают пользоваться формулой

$$D_{\text{фак}} = \frac{F(V_{\text{усл}} - W)}{100 \cdot V_{\text{фак}}} \cdot D_{\text{усл}}, \quad (7)$$

где W – объем стока, аккумулированного вышележащим водоемом.

М.А. Фортунатов (1974) предлагает оценивать водообмен водохранилищ не только применительно к их полному объему, но и полезному, что особенно важно для водохозяйственных целей:

$$D_{\text{п}} = \frac{W_{\text{ст.ГЭС}}}{V_{\text{п}}}, \quad (8)$$

где $V_{\text{п}}$ – полезный объем водоема [35].

В.А. Знаменский [14,15,16] считает целесообразным совместное использование показателей внешнего водообмена искусственных водоемов по притоку и оттоку вод из них:

$$D_{\text{пр}} = \frac{W_{\text{пр}}}{V},$$

$$D_{\text{от}} = \frac{W_{\text{от}}}{V},$$

где $W_{\text{от}} = W_{\text{ст.гЭС}}$, т.е. представленные им формулы – это показатели внешнего водообмена по С.В. Григорьеву и Л.И. Дубровину соответственно (формулы 1 и 2).

В 1975 г. В.Н. Штефан [36] предложил средний коэффициент водообмена водохранилища, учитывающий как объем притока вод в водоем, так и сток из него,

$$D = \frac{W_{\text{пр}} + W_{\text{ст}}}{2V}, \quad (9)$$

где $W_{\text{ст}}$ – объем сброса вод из водоема (т.е. $W_{\text{ст}} = W_{\text{ст.гЭС}}$).

А.В. Караушев в 1978 г. время смены вод в водоемах за счет процессов внешнего водообмена оценил формулой вида

$$T = - \frac{2,3 V}{Q_{\text{в}} + Q_{\text{исп}}} \cdot \lg \left(1 - \frac{W_{\text{ит}}}{V} \right), \quad (10)$$

где $W_{\text{ит}}$ – объем вытекающей воды за время t , $Q_{\text{в}}$ и $Q_{\text{исп}}$ – расходы вытекающей и испаряющейся воды, V – объем воды в водоеме [18].

Все приведенные выше формулы В.А.Знаменский [15] сводит к трем основным показателям, характеризующим интенсивность внешнего водообмена:

а) коэффициенту водообмена по притоку $D_{\text{пр}} = \frac{W_{\text{пр}}}{V}$ (формула С.В.Григорьева),

б) коэффициенту водообмена по оттоку (стоку) $D_{ст} = \frac{W_{ст.ГЭС}}{V}$ (формула

Л.И.Дубровина),

в) среднему коэффициенту водообмена $D = \frac{W_{пр} + W_{от}}{2V}$.

Нам представляется совершенно верной подобная терминология, отражающая сущность упомянутых коэффициентов, которые у различных авторов имеют разные названия (коэффициенты условного водообмена, проточности и т.п.).

Практически все представленные показатели интенсивности внешнего водообмена отражают его горизонтальную составляющую. Лишь в формуле Н.В.Буторина имеется попытка оценить не только горизонтальную составляющую внешнего водообмена искусственного водоема, но и его вертикальную составляющую (атмосферные осадки и испарения с водной поверхности).

Так ее автор попытался учесть одну из вертикальных составляющих внешнего водообмена – водообмен через границу вода–воздух. Другая вертикальная составляющая – водообмен через границу вода–грунт, о необходимости учета значимости которой указывает К.К. Эдельштейн [43,44], пока вне поля зрения исследователей, т.е. до настоящего времени отсутствует показатель количественной оценки этой составляющей.

Приверженность различных авторов [1,3,6,8,10,16,18,33,35,36] к оценке лишь горизонтальной составляющей внешнего водообмена в водоемах объясняется отчасти тем, что роль, например, атмосферных осадков или испарения с водной поверхности в водном балансе водохранилищ, особенно в годовом аспекте, не столь уж велика. Так, на Камском и Воткинском водохранилищах на долю осадков и испарения приходится 1,5–2 % в годовом балансе водоемов.

Как указывает А.С. Литвинов [25], при расчете месячных коэффициентов внешнего водообмена необходим учет всех составляющих водного баланса, поскольку приток воды может существенно отличаться от сбросов воды, а роль атмосферных осадков и испарения в отдельные фазы водного режима водохранилища может существенно возрастать (по сравнению с газовым аспектом). В соответствии с этим формулу В.Н. Штефана он использует в виде

$$D = \frac{\sum W_{пр} + \sum W_{р}}{2V}, \quad (11)$$

где $\sum W_{пр}$ и $\sum W_{р}$ – сумма приходных и расходных составляющих водного баланса водоема.

В большинстве представленных выше формул для оценки интенсивности внешнего водообмена (1–4,8–11) в знаменателе фигурирует величина объема водохранилища (в зависимости от расчетного периода – средняя за год, месяц и т.д.). Данная характеристика определяется авторами по значениям уровней воды с использованием объемных кривых. К.К. Эдельштейн [44] предлагает в знаменателе формулы внешнего водообмена использовать полусумму значений объема воды, находящейся в водохранилище в начале и в конце расчетного периода.

К настоящему времени дана оценка среднегодовых и месячных величин внешнего водообмена большинства средних и крупных водохранилищ России и стран ближнего зарубежья [6, 11, 12, 14, 15, 16, 17, 19, 20, 21, 23, 27, 28, 29, 30, 31, 35, 39, 40 и др.]. Исследователи чаще всего использовали формулу Л.И. Дубровина (1), хотя на кафедре гидрологии МГУ и в ИБВВ РАН предпочитают применять формулу В.Н. Штефана (9).

Понимая необходимость оценки интенсивности внешнего водообмена водохранилищ не только в целом, но и применительно к их конкретным морфометрическим

участкам, Л.И. Дубровин и Ю.М. Матарзин [11] еще в 1959 г. выполнили такой расчет для Камского водохранилища. Они использовали формулу Л.И. Дубровина (1) в измененном варианте:

$$D_{уч} = \frac{W_{ст.ГЭС}}{V_{уч}}, \quad (12)$$

где $V_{уч}$ —объем морфометрического участка водоема. Позже аналогичные расчеты были выполнены и другими исследователями (например, И.К.Маукевичем по Воткинскому [26], К.К.Эдельштейном по Можайскому [40] водохранилищам). Недостатком такого подхода является использование величины $W_{ст.гэс}$ при оценке внешнего водообмена различных морфометрических участков. Данную характеристику (с некоторой оговоркой) можно использовать только для нижней приплотинной части водохранилища. Ее применение для средней и тем более верхней части водоема предполагает недостаточно точную оценку внешнего водообмена морфометрических участков этих районов водохранилища. Для данных частей водоема целесообразнее в числителе формулы (12) использовать величину притока вод по основной реке и ее наиболее крупным притокам. Однако использование различных показателей при оценке интенсивности внешнего водообмена разных частей водохранилища вносит некоторую неопределенность и делает результаты расчета внешнего водообмена морфоучастков водоема мало сопоставимыми.

В 1975 г. В.А. Знаменский [13] предложил переход от определения величины внешнего водообмена всего водоема к аналогичной характеристике его конкретных участков с использованием формулы

$$D_i = D \cdot \frac{H}{H_i} \cdot \frac{B}{B_i}, \quad (13)$$

где D , H и B —соответственно внешний водообмен, глубина и ширина водоема в целом; D_i , H_i и B_i —эти же характеристики применительно к конкретному участку водохранилища. Данный подход к оценке интенсивности внешнего водообмена, хотя в известной мере и учитывает морфометрические особенности водоема (через глубину и ширину), во многом достаточно формален и, по-видимому, в силу этого не получил к настоящему времени достаточно широкого применения.

В 1979 г. Т.П. Девяткова [9] предложила методику расчета среднемесячных расходов воды в замыкающих створах морфометрических участков водохранилища, которая была проверена на Камском и Воткинском водохранилищах и дала вполне удовлетворительные результаты [22]. Таким образом, появилась возможность оценить величину среднемесячного стока через замыкающий створ каждого морфометрического участка водохранилища ($W_{ст.уч}$). Имея данные о величинах объемов водных масс морфоучастков водоема, можно перейти к оценке интенсивности внешнего водообмена этих участков. При этом может быть использована структура как формулы Л.И.Дубровина (1), так и формул С.В. Григорьева (2) и В.Н. Штефана (9). На наш взгляд, целесообразнее использовать структуру формулы Л.И. Дубровина, поскольку она точнее других, отражает характер регулирования стока. При этом формула для оценки интенсивности внешнего водообмена морфоучастков водоема имеет вид

$$D_{уч} = \frac{W_{ст.уч}}{V_{уч}}, \quad (14)$$

где $V_{уч}$ —объем конкретного морфометрического участка водохранилища. Расчет среднемесячных величин данного показателя произведен автором для всех морфометриче-

ских участков Камского (1959–1980гг.) и Воткинского (1964–1980гг.) водохранилищ [22].

Полученные оценки внешнего водообмена (по формулам 1–14) отражают гипотезу вытеснения одних водных масс другими (модель водоема-вытеснителя). Кроме этой модели существует еще модель водоема-смесителя, при которой дается оценка водообновления в искусственных водоемах, согласно гипотезе полного мгновенного смещения вод. Впервые понятие водообновления было введено А.П. Браславским в 1961 г. [4] при оценке минерализации воды в искусственных водоемах. По мнению В.Н.Штефана [37], данный показатель определяет долю воды притоков, поступившей в водоем в течение расчетного периода и оставшейся в нем до конца этого периода, от всей воды в водоеме в конце периода.

Существуют два подхода к оценке водообновления. Один из них предполагает такую оценку через динамические характеристики водоема, другой—через гидрохимические. Оба варианта с успехом использованы В.Н. Штефаном [37,38] и К.К.Эдельштейном [42,43,44] при оценке водообновления водохранилищ Московречной системы. В первом случае коэффициент водообновления определялся по выражению

$$B=1 - \left(\frac{W_0}{W_t}\right)^{1+(V_c/W_t)/(1-(W_0/W_t))}, \quad (15)$$

где W_0 и W_t —начальный и конечный для расчетного периода времени объемы воды в водоеме, V_c —объем стока на замыкающем створе водоема. Данный показатель может принимать только положительные значения, изменяясь от нуля до единицы. При использовании показателей гидрохимического режима водохранилища коэффициент водообновления определяется по выражению

$$B = \frac{M_t - M_0}{M_{\text{п}} - M_0}, \quad (16)$$

где M_0 и M_t —минерализация воды в водоеме в начальный и конечный моменты времени, $M_{\text{п}}$ —средняя минерализация воды притоков за расчетный период времени. Между показателями и коэффициентами внешнего водообмена существует тесная связь. Впервые такая зависимость была получена В.Н. Штефаном [36,37,38] для Можайского водохранилища и его участков. Поскольку диапазон значений коэффициента внешнего водообмена (D) большой, К. К. Эдельштейном [42] была реализована возможность переноса полученных связей для водохранилищ других систем (Волжской, Камской и др.). В диапазоне $0,25 < D < 3,35$ связь имела вид сложной логарифмической функции

$$B=0,03 \ln^2 D + 0,30 \ln D + 0,62. \quad (17)$$

В диапазоне $D < 0,25$ связь имела вид линейной функции $B=D$; при $D > 3,35$ коэффициент водообновления $B=1$. В период равновесия водного баланса в водоеме в соответствии с гипотезой полного мгновенного смещения вод водообновление (B) зависит исключительно от общей проточности водоема, характеризуемой значениями коэффициентов внешнего водообмена (D). В фазы наполнения и сработки водохранилища его величина зависит, кроме того, от соотношения начального (W_0) и конечного (W_t) объемов воды в водоеме.

Рассматривая водообновление как эколого-гидрологический показатель пойменных водоемов и развивая идеи В.Н. Штефана и К.К. Эдельштейна, В.М. Тимченко [31] предложил вариант расчета зоны смещения «старой» и «новой» воды в водоеме. По его мнению, в период наполнения водоема граница между «старой» и «новой» водой из-за перемешивания (в основном турбулентного) размывается и формируется область (объем) смещения ($W_{\text{см}}$), которую можно оценить по выражению вида

$$W_{см} = V_{ср} \ell_{см} (H_0 + 0,5 \Delta H_{нов}), \quad (18)$$

где $V_{ср}$ – средняя ширина водоема в зоне перемещения границы между "старой" и "новой" водами, $\ell_{см}$ – ширина зоны смещения вод, H_0 – средняя глубина водоема перед началом цикла наполнения, $\Delta H_{нов}$ – подъем уровня воды в водоеме при наполнении. Параметры $V_{ср}$ и H_0 устанавливаются в соответствии с морфометрическими характеристиками водоема. Ширина зоны смещения ($\ell_{см}$) зависит от интенсивности и длительности перемешивания "старой" и "новой" воды. Для определения этого параметра ученый предлагает пользоваться выражением вида

$$\ell_{см} = \sqrt{2K_L \cdot T}, \quad (19)$$

где K_L – коэффициент горизонтального турбулентного перемешивания, T – длительность расчетного периода. Учитывая выводы исследований Н.В. Буторина и А.С. Литвинова [7], В.Б. Штокмана [39], В.Т. Тимофеева и В.В. Панова [32] и др., величину K_L В.М.Тимченко принимает равной 100 м·м/с. Исходя из этого для пойменных водоемов он предлагает использовать следующую формулу для оценки степени водообновления

$$B = \frac{0,35 \sqrt{K_L \cdot T} V_{ср} \cdot (H_0 + 0,5 \Delta H_{нов})}{W_0}. \quad (20)$$

Таким образом, в настоящее время существует два подхода к оценке внешнего водообмена искусственных водоемов. Один из них отражает гипотезу вытеснения одних водных масс другими – модель водоема-вытеснителя, другой – гипотезу полного мгновенного смещения вод – модель-смесителя. Оба варианта постоянно совершенствуются и развиваются.

Библиографический список

1. Бакулин К.А. Морфометрические характеристики Рыбинского водохранилища / К.А. Бакулин // Труды ИБВВ АН СССР. 1968. Вып. 16(19).
2. Богословский Б.Б. Очерки по озероведению / Б.Б. Богословский, С.Д. Муравейский. М.: Изд-во. МГУ, 1955.
3. Богословский Б.Б. Некоторые особенности водообмена и водных масс континентальных водоемов / Б.Б. Богословский, В.А. Кириллова, С.А. Филь // Тр. IV Всесоюз. гидролог. съезда. Л.: Гидрометеиздат, 1975. Т.5.
4. Браславский А.П. Расчет минерализации воды в водохранилищах / А.П. Браславский // Гидрохимические материалы. 1961. Т.32.
5. Буторин Н.В. Формирование гидрологического режима Горьковского водохранилища (1955–1959гг.) / Н.В. Буторин // Тр. ИБВВ АН СССР. 1963. Вып. 5(8).
6. Буторин Н.В. О водных массах континентальных водоемов / Н.В. Буторин // Тр. ИБВВ АН СССР. 1965. Вып. 7(10).
7. Буторин Н.В. Расчет коэффициента турбулентного обмена в Рыбинском водохранилище / Н.В. Буторин, А.С. Литвинов // Тр. ИБВВ АН СССР. 1968. Вып. 16(19).
8. Григорьев С.В. О некоторых определениях и показателях в озероведении / С.В. Григорьев // Матер. по гидрологии Карелии. Петрозаводск: Изд-во Карельск. филиала АН СССР. 1958. Вып. 18.
9. Девяткова Т.П. К вопросу об определении среднемесячных расходов воды в водохранилищах / Т.П. Девяткова // Анализ и прогноз метеорологических элементов и речного стока. Вопросы охраны среды. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 1979.

10. Дубровин Л.И. Новые данные к гидрометеорологической характеристике Камского водохранилища / Л.И. Дубровин // Докл. IV Всеурал. совещ. по физико- и экономико-географ. районированию Урала. Пермь: Изд-во Перм. отд. Географ. об-ва СССР, 1958.
11. Дубровин Л.И. Камское водохранилище / Л.И. Дубровин, Ю.М. Матарзин, И.А. Печеркин. Пермь: Перм. кн. изд-во, 1959.
12. Ершова М.Г. Водные массы Череповецкого водохранилища / М.Г. Ершова // Тр. ИБВВ АН СССР. Л.: Наука, 1968. Вып. 16(19).
13. Знаменский В.А. Влияние гидрологических и гидродинамических факторов на изменение концентраций химических веществ в водохранилищах волжского каскада / В.А. Знаменский // Матер. Всесоюзной науч. конф. По проблеме комплексного использования и охраны водных ресурсов бассейна Волги. Пермь, 1975. Вып. 2.
14. Знаменский В.А. Влияние основных гидрологических факторов на минерализацию воды в водохранилищах волжско-камского каскада / В.А. Знаменский, Н.Н. Москвина // Тр. ГГИ. Л.: Гидрометеиздат, 1976. Вып. 231.
15. Знаменский В.А. Влияние гидролого-динамических факторов на изменение содержания химических веществ в водохранилище / В.А. Знаменский // Тр. ГГИ. Л.: Гидрометеиздат, 1977. Вып. 246.
16. Знаменский В.А. Гидрологические процессы и их роль в формировании качества воды / В.А. Знаменский. Л.: Гидрометеиздат, 1981.
17. Зиминова Н.А. Элементы гидрологического режима и водный баланс Ивановского водохранилища за 1951–1956гг. / Н.А. Зиминова // Тр. ИБВ АН СССР. М.;Л.: Наука, 1959. Вып. 2(5).
18. Караушев А.В. Внешний водообмен и формирование качества воды в озерах и водохранилищах / А.В. Караушев // Тр. ГГИ.–Л.: Гидрометеиздат, 1978. Вып. 249.
19. Кисин И.М. Сравнительная характеристика составляющих водного баланса водохранилищ Москворецкой системы / И.М. Кисин, Е.Ф. Семенов, В.А. Скорняков // Вестник МГУ. Сер. 5. География. 1976. №6.
20. Кисин И.М. Коэффициент водообмена и режим составляющих водного баланса водохранилищ / И.М. Кисин, Е.Ф. Семенов // Комплексные исследования водохранилищ. М.: Изд-во МГУ, 1978. Вып. 4.
21. Кисин И.М. Водный баланс Истринского водохранилища и динамика его составляющих / И.М. Кисин, Е.Ф. Семенов, В.А. Скорняков // Там же, 1980. Вып. 5.
22. Китаев А.Б. Роль гидродинамических факторов в формировании гидрохимического режима долинных водохранилищ (на примере камского каскада). Автореф. дис.... канд. геогр. наук / А.Б. Китаев Пермь, 1983.
23. Курдина Т.Н. Элементы гидрологического режима и водный баланс Угличского водохранилища / Т.Н. Курдина // Тр. ИБВ АН СССР. М.; Л.: Наука, 1959. Вып. 2(5).
24. Лащилова В.М. О гидрологическом режиме Усть-Илимского водохранилища в период наполнения / В.М. Лащилова // Тр. Зап.-Сиб. регион. науч.-иссл. гидрометеорол. ин-та. Новосибирск, 1978. Вып. 37.
25. Литвинов А.С. Энерго- и массообмен в водохранилищах Волжского каскада / А.С. Литвинов. Ярославль: Изд-во Ярослав.техн. ун-та, 2000.
26. Мацкевич И.К. Особенности гидрологического режима Воткинского водохранилища в связи с его положением в каскаде: Автореф. дис.... канд. геогр. наук / И.К. Мацкевич. Пермь, 1973.

27. Подлипский Ю.И. Стоковое течение в Красноярском водохранилище на разных стадиях его заполнения / Ю.И. Подлипский // Тр. Зап.-Сиб. регион. науч.-иссл. гидрометеорол. ин-та. Новосибирск, 1974. Вып. 13.
28. Подлипский Ю.И. О скоростях течения и времени добегания воды в Новосибирском водохранилище / Ю.И. Подлипский // Там же, 1981. Вып. 51.
29. Рутковский В.И. Водный баланс Рыбинского водохранилища за период с 1947 по 1955г. / В.И. Рутковский, Т.Н. Курдина // Тр. ИБВ. М.;Л.: Наука, 1959. Вып. 1(4).
30. Скорняков В.А. Водный баланс Можайского водохранилища / В.А. Скорняков // Комплексные исследования водохранилищ. М.: Изд-во МГУ, 1971. Вып. 1.
31. Тимченко В.М. Эколого-гидрологические исследования водоемов Северо-Западного Причерноморья / В.М. Тимченко. Киев: Наукова Думка, 1990.
32. Тимофеев В.Т. Косвенные методы выделения и анализа водных масс / В.Т. Тимофеев, В.В. Панов. Л.: Гидрометеиздат, 1962.
33. Филь С.А. Водобмен крупных водохранилищ юго-запада Европейской части СССР / С.А. Филь // Рыбное хозяйство. Киев: Урожай, 1971. №12.
34. Фомичев И.Ф. Многолетние изменения составляющих водного баланса Рыбинского водохранилища и их влияние на водообмен и уровень / И.Ф. Фомичев, А.С. Литвинов // Водные ресурсы. 1980. №4.
35. Фортунатов М.А. О проточности и водообмене водохранилищ / М.А. Фортунатов // Тр. ИБВВ АН СССР. Л.: Наука, 1974. Вып. 26(29).
36. Штефан В.Н. К расчету водообмена долинных водохранилищ / В.Н. Штефан // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 1975. №5.
37. Штефан В.Н. Водообновление стока Москворецкой системы / В.Н. Штефан // Там же, 1979. №4.
38. Штефан В.Н. Водообмен водохранилищ волжско-камского каскада / В.Н. Штефан // Комплексные исследования водохранилищ. М.: Изд-во МГУ, 1980. Вып. 5.
39. Штакман В.Б. Избранные труды по физике моря / В.Б. Штакман. Л.: Гидрометеиздат, 1970.
40. Эдельштейн К.К. Формирование, перемещение и трансформация водных масс Горьковского водохранилища / К.К. Эдельштейн // Тр. ИБВВ АН СССР. Л.: Наука, 1968. Вып. 18(21).
41. Эдельштейн К.К. Водообмен и течения / К.К. Эдельштейн // Комплексные исследования водохранилищ. М.: Изд-во МГУ, 1979. Вып.3.
42. Эдельштейн К.К. О соотношении показателей водообмена долинных водохранилищ / К.К. Эдельштейн // Водные ресурсы. 1981. № 6.
43. Эдельштейн К.К. Водные массы долинных водохранилищ / К.К. Эдельштейн. М.: Изд-во МГУ, 1991.
44. Эдельштейн К. К. Водохранилища России: экологические проблемы, пути их решения / К.К. Эдельштейн. М.: ГЕОС, 1998.