

УДК 556.552

**ВОДООБМЕН В МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ УЧАСТКАХ
ВОТКИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА****Китаев А.Б.***ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», Пермь,
e-mail: hydrology@psu.ru*

Интенсивность водообмена является важнейшей характеристикой экосистемы любого объекта, в том числе и искусственных водоемов, каковыми являются водохранилища. В настоящем исследовании дан анализ существующих методов оценки внешнего водообмена по модели водоема–вытеснителя. В основу работы положен показатель, представляющий отношение сброса вод с каждого морфометрического участка к величине объема этого участка. Величина сброса вод определялась через расходы воды по методике Т.П. Девятковой для границ морфометрических участков. Величины же объемов вод определялись по объемным кривым. Выбор используемого в работе метода обусловлен простотой расчета и прежде всего тем, что он отражает характер регулирования стока водохранилищем. Представлены результаты расчета среднемесячных величин показателя внешнего водообмена всех морфометрических участков Воткинского водохранилища в современных условиях (по материалам 1993-2004 гг.). Дана сравнительная характеристика полученных результатов с материалами, ранее выполненных исследований. Полученные величины обмена вод морфометрических участков Воткинского водохранилища могут быть с успехом использованы при оценке процессов разбавления и смешения сточных вод, сбрасываемых в водоем, а также при оценке состояния водной экосистемы водохранилища.

Ключевые слова: водохранилище, морфометрический участок, водный баланс, обмен вод**WATER EXCHANGE IN MORPHOMETRIC SITES OF VOTKINSK
WATER RESERVOIR****Kitaev A.B.***Perm State University, Perm, e-mail: hydrology@psu.ru*

The intensity of water exchange is the most important characteristic of an ecosystem of any object including artificial reservoirs which reservoirs are. In the real research the analysis of the existing methods of assessment of external water exchange on reservoir displacer model is given. The indicator representing the relation of dumping of waters from each morphometric site to the size of volume of this site is the basis of work. The size of dumping of waters was defined by water expenses by T.P. Devyatkova's technique for borders of morphometric sites. Sizes of volumes of waters were determined by volume curves. The choice of the method used in work is caused by simplicity of calculation and first of all the fact that it reflects the nature of regulation of a drain a reservoir. Results of calculation of average monthly sizes of an indicator of external water exchange of all morphometric sites of the Votkinsk reservoir in modern conditions are presented (on materials of 1993-2004). The comparative characteristic of the received results with materials, earlier executed researches is given. The received sizes of exchange of waters of morphometric sites of the Votkinsk reservoir can be used with success at assessment of processes of dilution and mixture of the sewage dumped in a reservoir and also at assessment of a condition of a water ecosystem of a reservoir.

Keywords: reservoir, morphometric site, water balance, water exchange

Среди различных видов антропогенно-воздействия на природу видное место занимает создание водохранилищ, перераспределяющих речной сток во времени и пространстве. При этом существенное изменение претерпевают различные составляющие единого процесса стока: водный, тепловой, солевой, биологический и т.д. При зарегулировании стока изменяется, прежде всего, интенсивность и скорость обновления вод в реках и речных системах.

Интенсивность водообмена является важнейшей характеристикой экосистемы любого объекта, в том числе и искусственных водоемов, каковыми являются водохранилища. По мнению К.К. Эдельштейна [5] 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 под ним понимается замена вод, находящихся в водоеме, новыми водами, поступившими извне [4]. 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 непосредственно связан с водным балансом водоемов. Он осуществляется по-разному в сточных и бессточных водных объектах. В реках и большинстве сточных водоемов, к которым принадлежат водохранилища (кроме многих прудов), водообмен осуществляется в основном путем притока воды с водосборов и стока из водотока или водоема. С поступающими или вытекающими водами перемещаются содержащиеся в них наносы, растворенные вещества, а часто и планктон. Следовательно, чем интенсивнее водообмен, тем быстрее могут изменяться физико-химические свойства вод.

Материалы и методы исследования

В работе были использованы составляющие водного баланса Воткинского водохранилища за период с 1993 по 2004 г. (рис. 1). Расчет показателя внешнего водообмена выполнен с использованием методики определения среднемесячных величин расходов воды, на границах морфометрических участков, предложенной Т.П. Девятковой [1] и объемных кривых.

Результаты исследования и их обсуждение

Наибольшая величина годового сброса воды через Камскую ГЭС за рассматриваемый период составила 73,6 км³ (93,2% от прихода) в 1994 г., а наименьшая наблюдалась в 2004 г. и составила 49,5 км³ (92,9% от приходной части). Боковая приточность в водохранилище достигла максимального значения в 1995 г. (1,32 км³ или 2,1%), а минимального в 1996 г. (0,69 км³ или 1,2%). Наибольшее количество атмосферных

осадков было в 1994 г. и составило 0,72 км³ (0,9% от прихода), а наименьшее количество наблюдалось в 1996 г. и составило 0,43 км³ (0,8%). Наибольшее суммарное поступление вод в водохранилище было в 1994 г. (79,0 км³), а наименьшее в 2004 г. – 53,3 км³ [2].

Основной составляющей расходной части водного баланса водохранилища является поверхностный сток через Воткинскую ГЭС. Наибольшее значение этого поступления наблюдалось в 1994 г. и составило 77,1 км³ или 99,5% от всей расходной части, наименьшее же значение пришлось на 2004 г. (50,6 км³ или 99,2%). Величина потерь воды при испарении с поверхности водоема наибольшего значения достигала в 1998 г. и составила 0,47 км³ (0,8% от расходной части). Наибольшие суммарные потери воды из водохранилища были в 1994 г. и составили 77,5 км³, а наименьшие – в 2004 г. (51,0 км³).

Сопоставление приходных и расходных частей водного баланса показало, что в 1994 и в 2004 г. приток вод в водохранилище был несколько выше потерь воды из водоема (в 1994 г. – 79,0 км³ и 77,5 км³, а в 2004 г. – 53,3 км³ и 51,0 км³).

На основе полученных данных можно сделать вывод, что 1994 г. является многоводным, а 2004 г. – маловодным.

Камское водохранилище характеризуется большими колебаниями величин приходной и расходной частей, чем на Воткинском, что говорит о том, что Камское водохранилище можно отнести к природно-техногенному объекту, а Воткинское, зарегулированное с двух сторон, стоит отнести к техногенному объекту.

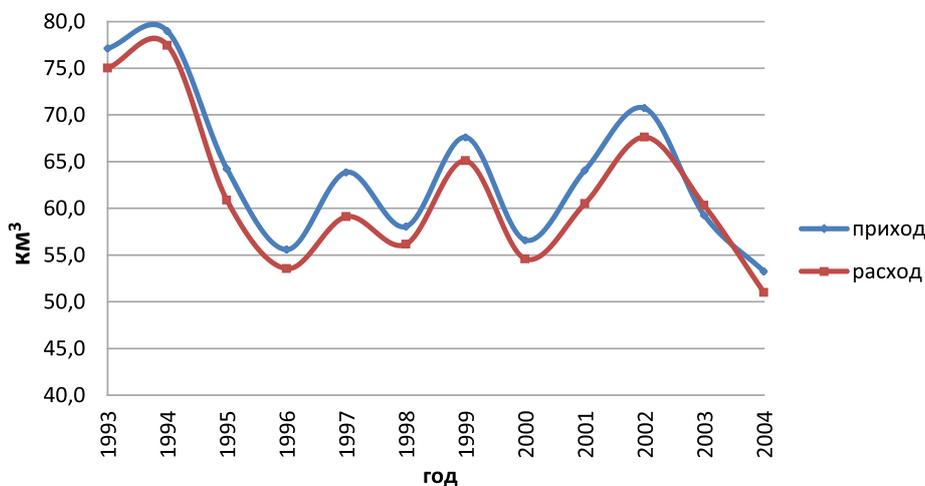


Рис. 1. Соотношение приходной и расходной частей водного баланса Воткинского водохранилища (1993–2004 гг.)

Если сравнивать водный баланс на Камских водохранилищах за выявленный многоводный (1994) и маловодный (2004) г. с коэффициентами, полученными автором за многоводный (на Камском водохранилище – 1965 г., на Воткинском – 1979 г.) и маловодный (1967) г., то можно сделать вывод, что на Камском водохранилище суммарный объем приходной и расходной частей в 1994 г. (73,8 км³ и 74,2 км³) выше, чем в 1965 г. (68,0 км³ и 62,1 км³). Причиной этого является отсутствие рассчитанного прихода воды на неизученных реках в 1965 г., потому что по основному и боковому притоку объем воды в 1965 г. был выше, чем в 1994 г. (37,0 и 29,6 – в 1965 г.; 36,5 и 27,0 – в 1994 г.). На Воткинском водохранилище суммарный объем приходной и расходной частей в 1994 г. (78,9 км³ и 77,5 км³) выше, чем в 1979 г. (73,6 км³ и 73,9 км³).

Сравнивая маловодные годы (1967 и 2004 г.) можно сказать, что на Камском и Воткинском водохранилище объемы приходной и расходной частей в 2004 г. были больше, чем в 1967 г. На Камском водохранилище объем приходной части в 1967 г. был 39,6 км³, а в 2004 г. – 51,5 км³, а объем расходной части составил 37,8 км³ и 50,2 км³. На Воткинском водохранилище объем приходной части в 1967 г. был 39,4 км³, а в 2004 г. – 53,3 км³, а объем расходной части составил 36,7 км³ и 51,0 км³ [3].

В работе показатели внешнего водообмена для всего водохранилища были рассчитаны по модели водоема-вытеснителя по трем основным показателям:

– коэффициенту водообмена по притоку

$$D_{\text{пр}} = \frac{W_{\text{пр}}}{V} \quad (\text{формула С.В. Григорьева}),$$

– коэффициенту водообмена по оттоку (стоку) $D_{\text{ст}} = \frac{W_{\text{ст.ГЭС}}}{V}$ (формула Л.И. Дубровина),

– среднему коэффициенту водообмена $D = \frac{W_{\text{пр}} + W_{\text{от}}}{2V}$ (формула В.Н. Штефана) (рис. 2).

Максимальные значения коэффициентов водообмена по всем трем формулам пришлось на 1994 г. и составили 9,40, 9,58 и 9,49. Минимальные же значения были в 2003 г. – 6,60, 6,48 и 6,54.

Сравнение коэффициентов водообмена Камского и Воткинского водохранилищ представлено на рис. 3.

На основе полученных данных можно сделать вывод, что обмен вод в Воткинском водохранилище происходит быстрее, чем в Камском водохранилище (в 1,5 раза), кроме 1998 и 2001 г.

При оценке интенсивности внешнего водообмена морфометрических участков Камского и Воткинского водохранилищ использован показатель, представляющий собой отношение стока с каждого конкретного участка водоема к его объему, т.е.

$$D_{\text{уч}} = \frac{W_{\text{ст.уч}}}{V_{\text{уч}}}.$$

Анализ водообмена по приведенной формуле за период с 1993 по 2004 г. по Камскому и Воткинскому водохранилищам показал, что во внутригодовом ходе внешний водообмен имеет три фазы:

- весеннее наполнение с максимальными показателями водообмена;
- летне-осенний период;
- зимняя сработка водохранилища.

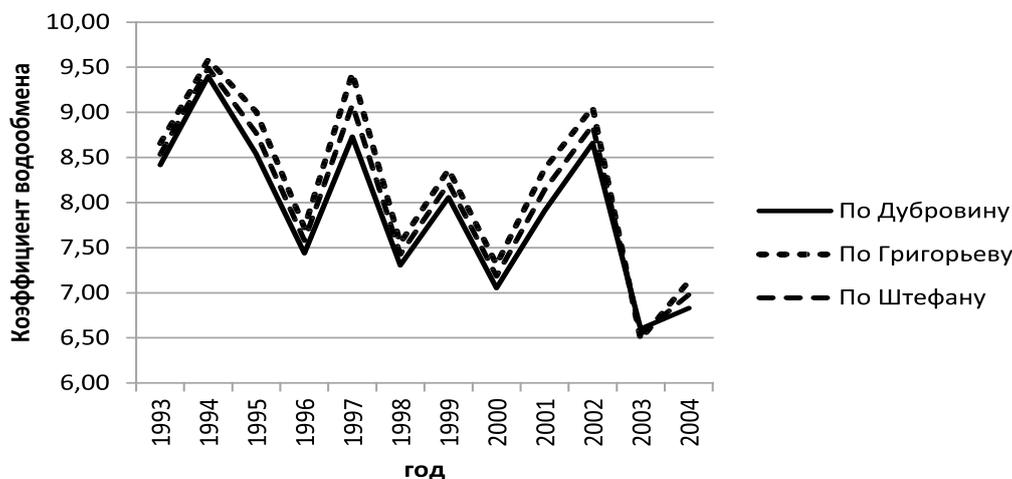


Рис. 2. Изменение коэффициентов внешнего водообмена на Воткинском водохранилище за период с 1993 по 2004 гг.

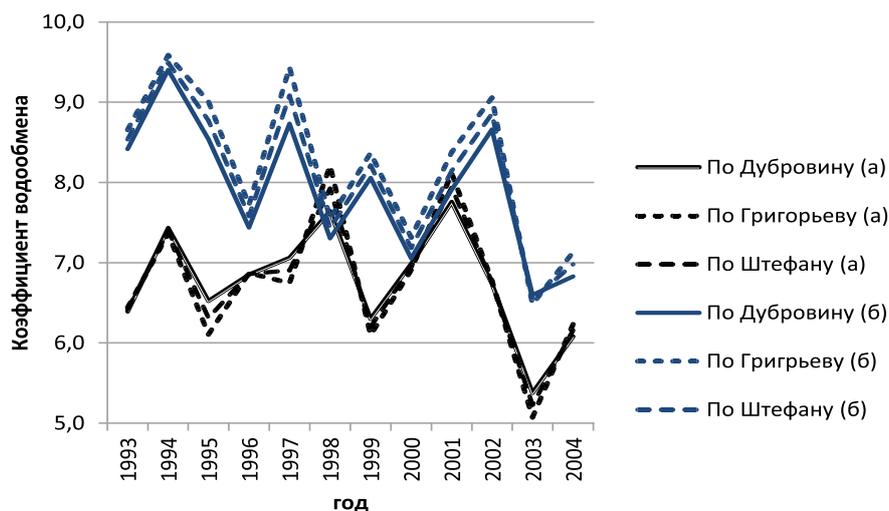


Рис. 3. Изменение коэффициентов внешнего водообмена на Камском (а) и Воткинском (б) водохранилищах за период с 1993 по 2004 гг.

В период наполнения водохранилищ весной интенсивность водообмена на всех морфометрических участках (рис. 4) заметно выше, чем в зимнее и летнее время. При этом максимальные величины относятся к верхним участкам водоемов, а минимальные – к приплотинным участкам. На водохранилищах отмечается некоторое увеличение показателей водообмена во время прохождения паводков в летне-осенний период, на Камском водохранилище это более заметно, чем на Воткинском.

Период весеннего наполнения на всех участках Воткинского водохранилища в 1993 г. отмечался в мае. В это время были зафиксированы наибольшие значения обмена вод. Так, на верхнем участке обмен вод составляет 32,8 раза, в центральной части на участке Жулановка–Калиновка – 9,4 раза, на приплотинном участке водообмен снизился до 4,4 раз. В летне-осенний период за счет дождевых паводков (октябрь) водообмен увеличился и составил на участке Пермь–Оханск 6,8 раза, на участке Жулановка–Калиновка уменьшился до 2,7 раз и в приплотинной части водохранилища снизился до 1,4 раз. В период зимней сработки водоема (декабрь) наблюдались минимальные значения обмена вод в годовом аспекте и составили для верхнего участка – 4,4 раза, для центральной части водохранилища – 1,2 раза и на приплотинном участке обмен вод происходит 0,7 раз в месяц.

Согласно рис. 1 1994 год является многогодовым за исследуемый период. В период весеннего наполнения водоема (май) (рис. 5) на первом участке водохранилища

обмен вод составил 21 раз, в центральной части – 6 раз, а на приплотинном участке снизился до 2,8 раз. В летне-осенний период сильно выраженного увеличения водообмена во время дождевых паводков в октябре 1994 г. не было и обмен вод на тех же участках составил – 6,2; 2,5 и 1,3 раза. В период зимней сработки наименьшие значения обмена вод для всех участков пришлось на январь и составили 3,7; 1,2 и 0,7 раз. В декабре этого года наблюдалось повышение водообмена до 10,8 раза на верхнем участке водохранилища, что явилось экстремальным значением обмена вод за весь рассматриваемый период для данной фазы водного режима.

В период весеннего наполнения водоема в 1995 г. максимальные значения водообмена на участке от Камской ГЭС до Оханска были в апреле и составили 21,2 раза. На нижележащих участках наибольшие значения обмена вод пришлось на май и составили для центрального участка 6,6 раза, для приплотинного – 3,2 раза. В летне-осенний период в августе наблюдалось повышение водообмена на центральном и приплотинном участке до 2,3 и 1,2 раза за счет дождевых паводков. Затем водообмен снизился и вновь увеличился только к периоду зимней сработки (декабрь): в верхнем участке до 5,2 раза, в центральном до 1,7 раз и на участке Калиновка–Воткинская ГЭС до 0,9 раз. Минимальные значения обмена вод пришлось на январь и составили для тех же участков –5,4; 1,0; 0,6 раза.

Согласно рис. 1 1996 г. является маловодным за исследуемый период. В период весеннего наполнения водохранилища макси-

мальные значения обмена вод на участках Камская ГЭС–Оханск и Оханск–Жулановка были в мае и составили 17,9 и 8,8 раза, а на участках Жулановка–Калиновка и Калиновка–Воткинская ГЭС максимум пришелся на июнь и составил 4,0 и 2,0 раза. В летне-осенний период водообмен несколько увеличился в октябре на верхнем участке

до 5,9 раз, в центральной части водохранилища составил 2,6 раза, на приплотинном участке – 1,4 раза. В период зимней сработки водохранилища минимальные значения водообмена отмечались в марте: в верхнем участке 4,0 раза, в центральном 1 раз и на участке Калиновка–Воткинская ГЭС 0,5 раза.

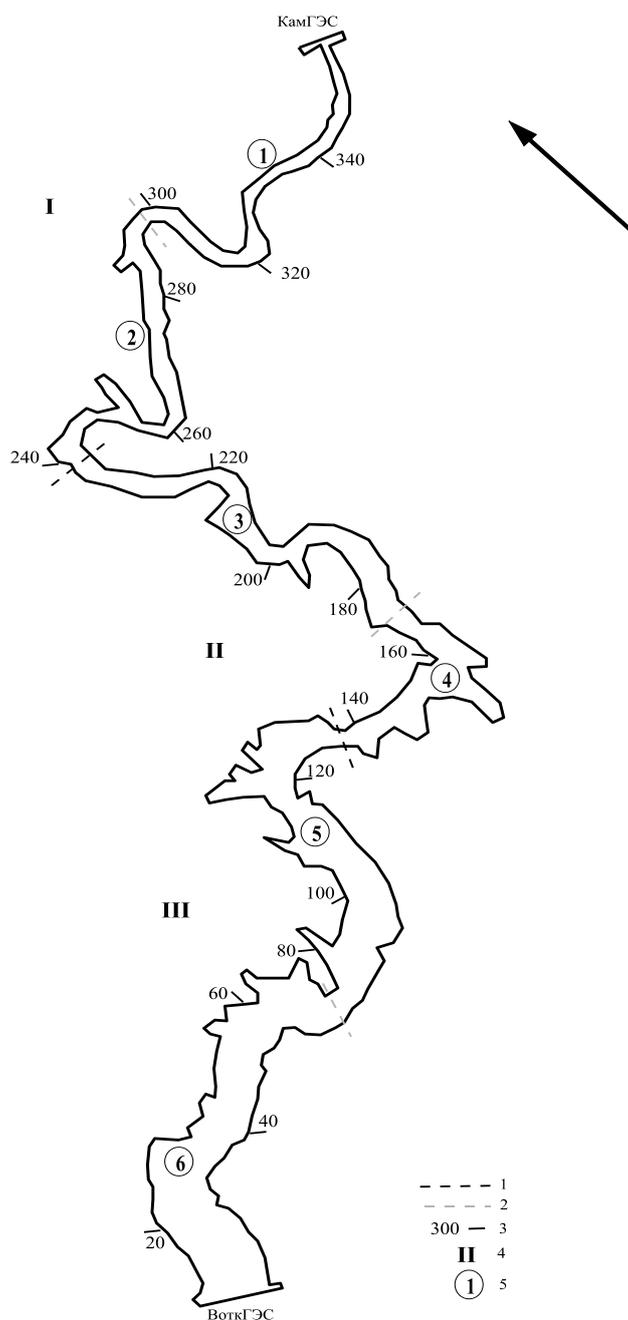


Рис. 4. Схема морфологических таксономов Воткинского водохранилища: 1 – границы районов; 2 – границы участков; 3 – расстояние (км) от плотины (по судовому ходу); 4 – номера районов; 5 – номера участков: 1 – Пермь – Краснокамск, 2 – Краснокамск – Сосновка (Оханск), 3 – Сосновка – Березовка, 4 – Березовка – Жулановка, 5 – Жулановка – Калиновка, 6 – Калиновка – Воткинская ГЭС

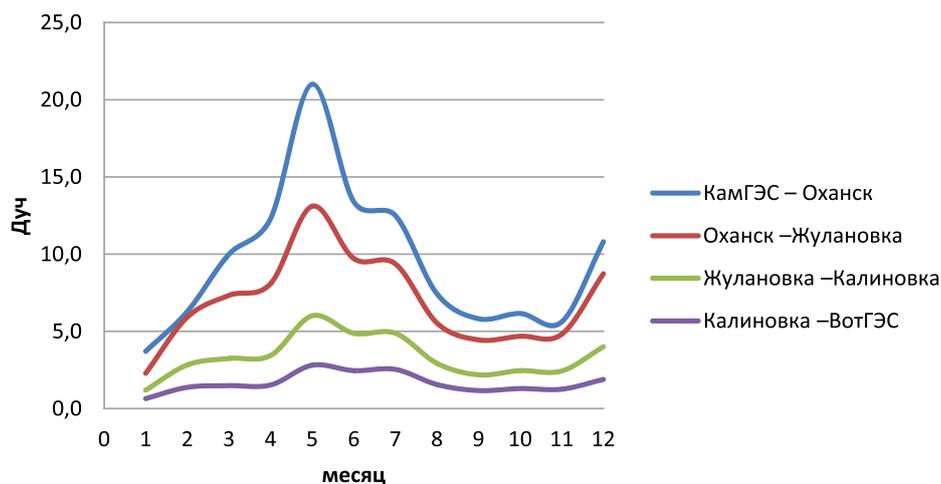


Рис. 5. Внутригодовой ход коэффициента $D_{\text{г.}}$ Воткинского водохранилища в 1994 г.

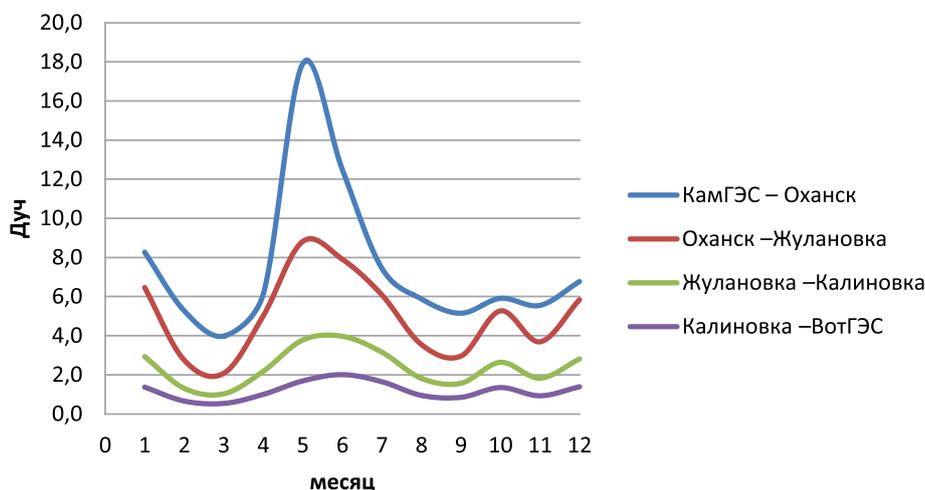


Рис. 6. Внутригодовой ход коэффициента $D_{\text{г.}}$ Воткинского водохранилища в 1996 г.

В период весеннего наполнения водоема в 1997 г. максимальные значения водообмена на всех участках Воткинского водохранилища были в мае и составили для верхнего участка 34,4 раза, для центрального участка – 10,6 раза, а для приплотинного – 5 раз. В летне-осенний период сильно выраженного увеличения водообмена во время дождевых паводков в октябре этого года не было и обмен вод для тех же участков составил – 5,5; 1,6 и 0,8 раза. В период зимней сработки водохранилища минимальные значения водообмена отмечались в феврале на участке Пермь–Оханск – 3,0 раза, Жулановка–Калиновка – 0,8 раза, Калиновка–Воткинская ГЭС – 0,4 раза.

В фазу весеннего наполнения водоема 1998 г. максимальные значения водообмена

на всех участках водохранилища были в мае и составили для верхнего участка 39,2 раза, для центрального участка – 9,6 раза, а для приплотинного – 4,2 раза. В летне-осенний период было некоторое увеличение водообмена на верхнем участке в октябре и обмен вод был 5,8 раза, а на центральном и приплотинном участке такое явление отмечалось в сентябре – 2,3 и 1,2 раза. В период зимней сработки водоема на всех участках минимальные значения были в декабре и составили 3,3; 1,1 и 0,6 раза.

В период весеннего наполнения водоема 1999 г. максимальные значения водообмена на всех участках водохранилища были в мае и составили для верхнего участка 40 раз, для центрального участка – 10,6 раз, а для приплотинного – 4,7 раз. В летне-осенний

период было некоторое увеличение водообмена на верхнем участке в сентябре, когда обмен вод составил 5,9 раза. В ноябре на всех участках водохранилища отмечалось некоторое повышение водообмена на верхнем участке до 5,7 раза, в центральной части водохранилища обмен вод составил 2,1 раза, на приплотинном участке – 1 раз. В период зимней сработки водоема на всех участках минимальные значения были в декабре и составили 4,4; 1,3 и 0,7 раза.

Характер пространственно-временных изменений обмена вод в последующие годы (2000-2004 гг.) рассматриваемого периода в целом аналогичен выше представленному временному интервалу.

Выводы

1. Рассматривая изменение показателей водообмена по длине водохранилища видно, что в течение года происходит плавное снижение обмена вод от плотины Камской ГЭС до плотины Воткинской ГЭС за весь расчетный период. Наибольшие их значения приходятся на период весеннего наполнения – май, минимальные на период зимней сработки.

2. Сравнение коэффициентов водообмена на Воткинском водохранилище за выявленный многоводный (1994) и маловодный (1996) год с их величинами, полученными автором за многоводный (1965) и маловодный (1967) год [3-5] показало, что в период весеннего наполнения водоема показатели водообмена в 1994 г. на верхнем участке (21 раз) больше, чем в 1965 г. (14,7 раза). На остальных участках водохранилища, наоборот, в 1965 г. (центральная часть – 7,3 раза, приплотинная – 3,5 раза) водообмен был больше, чем в 1994 г. (6 и 2,8 раза). В осталь-

ные фазы водного режима на всех участках водохранилища обмен вод выше в 1994 г.

3. На Воткинском водохранилище в период с февраля по апрель обмен вод в центральной и приплотинной части водохранилища происходил быстрее в 1967 г. в 1–1,5 раза, чем в 1996 г. В остальные месяцы на всех участках водоема водообмен в 1996 г. был выше, чем в 1967 г. в 1–3 раза.

4. В целом, наличие трех фаз во внутригодовом ходе внешнего водообмена и распределение коэффициентов $D_{уч}$ по длине водохранилищ остается неизменным.

5. Полученные величины обмена вод морфометрических участков Воткинского водохранилища могут быть с успехом использованы при оценке процессов разбавления и смешения сточных вод, сбрасываемых в водоем, а также при оценке состояния водной экосистемы водохранилища.

Список литературы

1. Девяткова Т.П. К вопросу об определении средних расходов воды на водохранилищах // Анализ и прогноз метеорологических элементов и речного стока. Вопросы охраны среды. – Пермь, 1979. – С. 129–134.
2. Китаев А.Б., Голубцова Д.Н. Водообмен Камского и Воткинского водохранилищ (по материалам 1999–2004 гг.) // Современные проблемы географии и геологии: мат. IV Всероссийской научно-прак. конф. с международным участием – Томск: Томский гос. ун-т, 2017. – Т.1. – С. 371–373.
3. Китаев А.Б. Оценка интенсивности протекания внутриводоемных процессов в камских водохранилищах // Современные исследования природных и социально-экономических систем. Инновационные процессы и проблемы развития естественнонаучного образования: мат. международной научно-прак. конф. – Екатеринбург: Урал. гос. пед. ун-т, 2017. – С. 76–81.
4. Обухов Е.В. Сравнительные показатели внешнего водообмена на водохранилищах Днепроовского каскада в условиях изменения климата // Географический вестник. – Пермь, 2015. – № 2. – С. 54–67.
5. Эдельштейн К.К. Гидрология озер и водохранилищ. – М.: Перо, 2014. – 399 с.