

А.Б. Китаев

## ВНУТРЕННИЙ ВОДООБМЕН ВОДОХРАНИЛИЩ КАМСКОГО КАСКАДА (ПО МОДЕЛИ В.А.ЗНАМЕНСКОГО)

A.B. KITAEV

INTERNAL WATER EXCHANGE OF KAMA WATER BASINS CASCADE  
(ON V.A.ZNAMENSKY MODEL)

Пермский государственный университет, 614990. Пермь, ул. Букирева, 15, e-mail: hydrology@psu.ru

Рассмотрены варианты оценки обмена вод в искусственных водоемах. Внутренний водообмен в морфоучастках Камского и Воткинского водохранилищ представлен в многолетнем аспекте с использованием модели В.А. Знаменского.

К л ю ч е в ы е с л о в а: водохранилище; обмен вод; внутренний водообмен.

По мнению К.К. Эдельштейна, *водообмен* представляет собой сочетание многообразных динамических процессов, одновременно протекающих в водоеме под действием на воду различных внешних сил, ее вязкости и инерции [18]. 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. Оценка внутреннего водообмена сложнее, чем внешнего, в силу чего методы его оценки разработаны еще недостаточно хорошо. Существует несколько принципиальных подходов, позволяющих отразить суть этого процесса. Представление об интенсивности внутреннего водообмена, связанного с перемешиванием вод в водоеме или его части, дают значения коэффициентов горизонтального и вертикального турбулентного обмена [1,2,5,6,11,12,13,14,17]. Внутренний обмен вод может быть оценен путем построения плана течений с использованием метода Н.М. Бернадского, Б.В. Проскуракова и других авторов. Представление о специфике внутреннего водообмена в отдельных частях водоемов дают схемы интегральной циркуляции их вод [15,16]. Обмен вод внутри искусственных водоемов может быть оценен по изменению объемов отдельных частей водохранилищ (метод В.А.Знаменского) [7,8] и по интенсивности их наполнения и сработки (метод Т.П.Девятковой – А.Б.Китаева) [4]. По мнению Т.П. Девятковой, представление о внутреннем водообмене водохранилищ можно получить и по коэффициентам проточности, представляющим собой отношение скоростей проточного течения в водоеме (созданном на реке) и в бытовых условиях при одном и том же расходе воды [3]. По нашему мнению, данный показатель, несомненно, имеет право на существование, но он, скорее, оценивает соотношение в гидродинамике водохранилища, созданного на реке, по отношению к бытовым условиям, т. е. показывает, насколько далек (или близок) гидродинамический режим искусственного водоема от речного. Показатель проточности Т.П. Девятковой, пожалуй, единственный, отражающий эту специфическую сторону создания водохранилищ.

В настоящей работе оценка внутреннего водообмена представлена по модели, разработанной В.А.Знаменским. В отличие от более ранних работ [9,10], где такая оценка дана только за характерные по водности годы (многоводный и маловодный), здесь представление о внутреннем обмене вод водохранилищ Камского каскада дано за многолетний период.

Модель В.А.Знаменского предполагает оценку внутреннего водообмена искусственных водоемов (или их частей) с использованием показателя, определяющего относительное изменение объема водохранилища:

$$D_{\Delta W} = \frac{\Delta W}{V_{\text{с}}}, \quad (1)$$

$$\Delta W = V_{\text{к}} - V_{\text{н}},$$

где  $\Delta W$  – изменение объема воды в водоеме за расчетный интервал времени (в данном случае месяц),  $V_{\text{к}}$  – объем воды в участке на конец месяца,  $V_{\text{н}}$  – объем воды в участке на начало месяца,  $V_{\text{в}}$  – средний объем воды в участке за тот же интервал времени.

Чтобы рассчитать коэффициент водообмена, необходимо знать значения объемов воды на каждом морфометрическом участке. Для этого использовались сведения по ежедневным уровням

воды, взятые из гидрологических ежегодников за 1959–1985 гг. Так как наблюдения за уровнями велись не во всех пунктах, то для каждого месяца года строились графики изменения начальных, конечных и средних уровней воды по длине водохранилища. По ним определялись необходимые значения уровней в том или ином пункте. В зависимости от значения уровней по таблицам координат кривых площадей и объемов водохранилища для морфометрических участков найдены необходимые объемы воды для расчетных участков.

Внутренний водообмен по данному методу оценен для всех морфометрических участков Камского (1959–1985 гг.) и Воткинского (1964–1985 гг.) водохранилищ. В качестве расчетного интервала времени взят календарный месяц. Величины показателя внутреннего водообмена, определяемые по формуле (1), могут быть как положительными, так и отрицательными – в зависимости от фазы водного режима водоема, а именно от характера наполнения и сработки водохранилища.

### **Внутригодовой ход коэффициента внутреннего водообмена**

Проанализировав изменение коэффициента внутреннего водообмена в течение года, можно отметить наличие трех периодов, которые совпадают с общими фазами режима водоема:

- 1) весеннего наполнения водоема;
- 2) летне-осенней стабилизации уровня водохранилища;
- 3) зимней сработки водоема.

На Камском водохранилище в целом внутригодовой год водообмена совпадает с тремя фазами режима водоема. Во все годы минимальные значения наблюдались в период зимней сработки. В период наполнения значения водообмена были положительными и максимальными. Во время летне-осенней стабилизации величины водообмена были как положительными, так и отрицательными.

В 1964 г. наблюдалось довольно растянутое половодье (почти 3 месяца). Годовой ход коэффициента внутреннего водообмена на всех морфометрических участках водохранилища был практически одинаков. В период зимней сработки водоема его величины отрицательны (идет опорожнение водохранилища) и изменяются от -0,15 до -0,65. Причем самая интенсивная сработка была отмечена в центральной части водоема (Пожва – Чермоз). Во время весеннего наполнения водохранилища показатель обмена вод имеет положительные величины. В мае, например, они изменялись от 0,62 (Слудка – Добрянка) до 1,52 (Березники – Быстрая). Летне-осенний период характеризовался небольшими колебаниями коэффициента внутреннего обмена вод в положительную и отрицательную сторону с некоторым преобладанием отрицательных значений.

Внутригодовой ход показателя обмена вод в многоводном 1965 г. (рис. 1) весьма схож с аналогичным показателем предыдущего года, несмотря на то что весеннее половодье не было столь растянутым. Во время зимней сработки водоема его величины изменялись от -0,18 до -0,53 (Пожва – Чермоз).

В период весеннего наполнения водоема колебания коэффициента внутреннего водообмена составили – от 0,63 до 1,19; т. е. диапазон колебаний между различными участками был несколько меньше, чем в 1964 г. В летне-осенний период показатель обмена вод был как положительным, так и отрицательным, но диапазон колебаний, как и в предыдущую фазу водного режима, был меньше. Преобладание отрицательных значений также присутствовало, но не было столь заметным, как в предыдущем году.

1966 г. по водности близок к среднемугодовому значению. В фазу зимней сработки водоема показатель обмена вод был отрицательным (рис. 2) и изменялся от -0,20 (Пожва – Чермоз) до -0,63 (Слудка – Добрянка).

В период весеннего наполнения водоема, которое длилось чуть больше двух месяцев, внутренний водообмен изменялся в довольно большом (для разных участков) диапазоне – от 0,55 (Добрянка – Камская ГЭС) до 2,15 (Тюлькино – Березники). Последняя величина является максимальной за весь многолетний период и характеризует наибольшую интенсивность наполнения

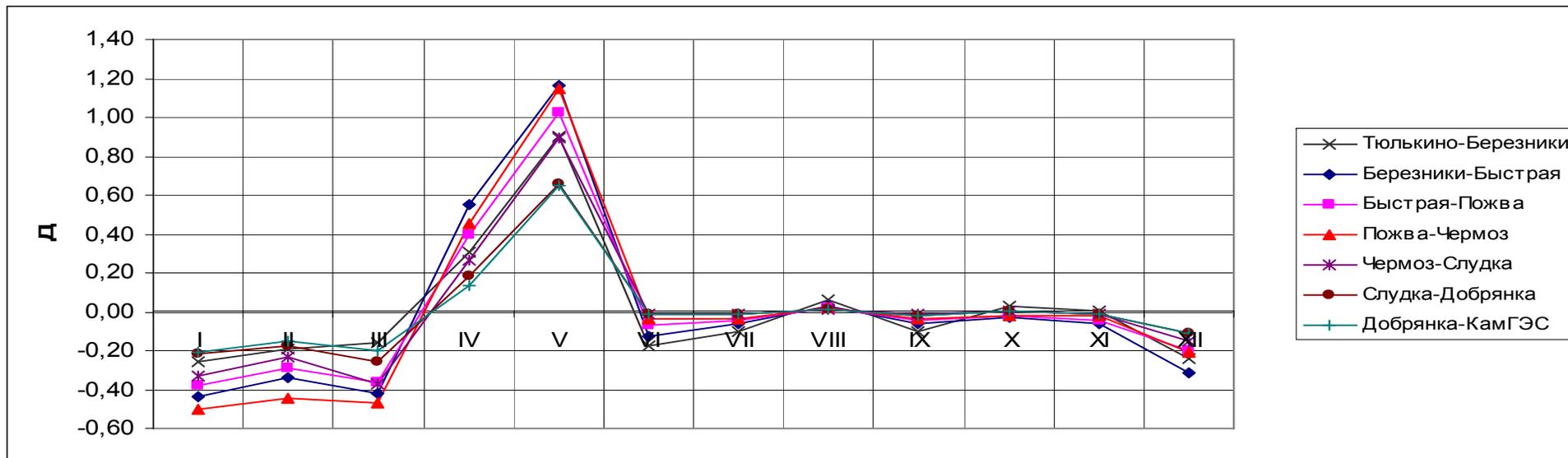


Рис.1. Изменение коэффициента внутреннего водообмена (D) Камского водохранилища за 1965 г.

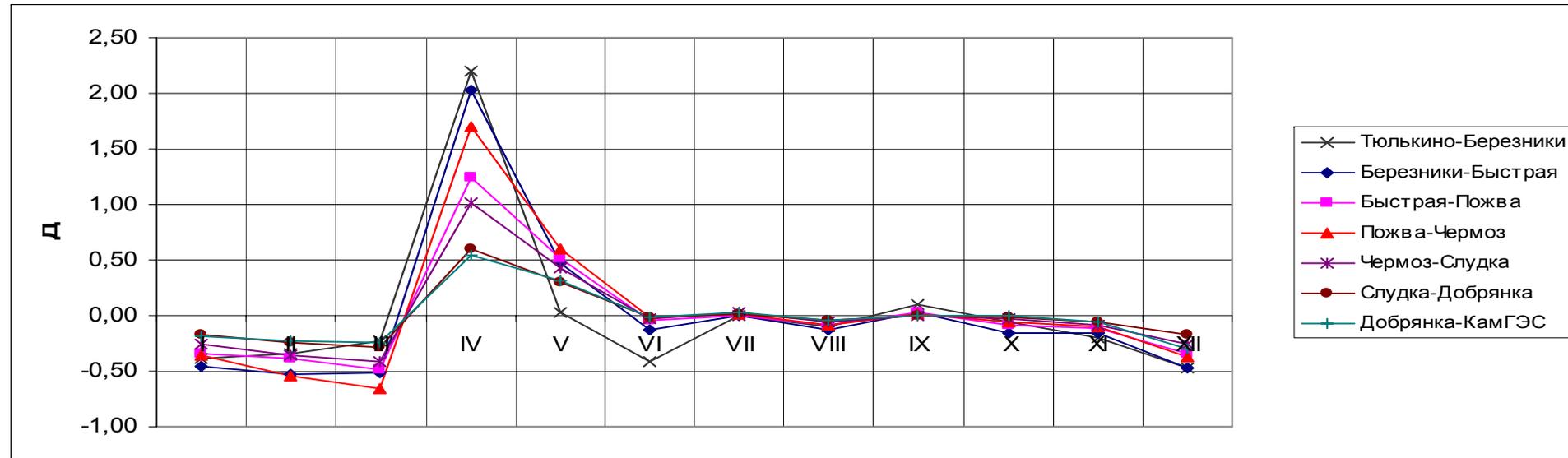


Рис.2. Изменение коэффициента внутреннего водообмена (D) Камского водохранилища за 1966 г.

водохранилища.

Изменения показателя внутреннего водообмена в фазу летне-осенней стабилизации уровня воды были практически аналогичны данному показателю предыдущего года.

В маловодном 1967 г. (рис.3) в феврале минимальный показатель водообмена составил -0,87 на участке Березники – Быстрая. В период весеннего наполнения (апрель) коэффициент внутреннего водообмена увеличился до +1,88 и к июню снизился до -0,44. В июле величина водообмена установилась в пределах +0,01. В связи с особенностями режима работы Камской ГЭС в этот год коэффициент водообмена в октябре увеличился до +0,03, а в декабре снизился от -0,45 на участке Березники – Быстрая до -0,14 к нижнему участку.

В 1968, 1970, 1971, 1974, 1976, 1978 гг. наблюдалось растянутое половодье. Так, в 1968 г. (рис.4) значения водообмена увеличились в апреле с +0,28 до +0,91, а максимума (+1,08) достигли в мае. В июне коэффициент водообмена на участке Тюлькино – Березники снизился до -0,59, а к июлю увеличился до +0,03. В остальные месяцы все величины водообмена были отрицательными.

В 1970 г. максимальные значения были в апреле и составили +0,46 на нижнем участке, и +1,45 на участке Пожва – Чермоз. Затем к маю произошло незначительное уменьшение величин водообмена: +0,36 на нижнем участке и +0,98 на участке Березники – Быстрая. В период летне-осенней стабилизации коэффициент водообмена изменялся в пределах от -0,07 до -0,67 на верхнем участке, а на остальных участках от 0 до -0,26.

В 1971 г. минимальные значения внутреннего водообмена были зафиксированы в феврале; они изменялись от -0,16 до -0,58. В апреле величины обмена вод стали положительными и достигли максимума (+1,07) в мае. В период стабилизации коэффициент водообмена колебался в обе стороны от нулевого значения.

В 1974 и 1976 г. внутригодовой ход коэффициента водообмена был почти аналогичен. Разница была в том, что в 1974 г. минимальные значения водообмена наблюдались в феврале, а 1976 г. в марте. Максимальные величины в 1974 г. пришлись на апрель и составили +1,57 на участке Пожва – Чермоз, а в 1976 г. +1,87 на участке Березники – Быстрая.

К маю значения водообмена снизились незначительно и были положительными, а в остальные месяцы на всех участках они оставались отрицательными (рис.5, 6).

В 1978 г. в период зимней сработки (февраль) величины водообмена были минимальными и изменялись от -0,26 до -0,64. Во время наполнения водоема коэффициент водообмена увеличился в апреле до +1,06 на участке Пожва – Чермоз, и в мае достиг максимального значения +1,24 на участке Березники – Быстрая. В июле–августе испарение с зеркала водоема было больше, чем осадки и значения водообмена снизились от -0,20 до -0,01. В сентябре–октябре в период паводков величины водообмена были положительными (рис.7).

В многоводном 1979 г. минимальные значения водообмена были зафиксированы в январе: они составили -0,68; к апрелю произошло увеличение до -0,04. Максимальная величина водообмена пришлась на май и равнялась +1,34 на участке Пожва – Чермоз. В августе коэффициент внутреннего водообмена уменьшился от +0,09 до +0,03 от верхнего участка к нижнему. А в октябре во время паводков значения водообмена изменялись от +0,28 до 0 к плотине Камской ГЭС. В остальные месяцы величины обмена вод оставались отрицательными (рис.8).

В 1984 г. в феврале минимальный коэффициент водообмена на участке Пожва – Чермоз был равен -0,97. В мае максимальные значения водообмена выросли с +0,67 до +1,38. В июле величина водообмена снизилась с -0,39 на участке Тюлькино – Березники до -0,05 на участке Добрянка – КамГЭС. В сентябре в связи с увеличением осадков на зеркало водоема коэффициент внутреннего водообмена увеличился до +0,22. В декабре значения водообмена изменились с -0,72 до -0,28.

Наполнение Воткинского водохранилища было осуществлено в 1964 г., поэтому ряд данных неполный и нет возможности представить внутригодовой ход коэффициента внутреннего водообмена. В 1965 г. внутригодовой ход коэффициента внутреннего водообмена совпадал с тремя фазами режима водоема. В период весеннего наполнения максимальное значение водообмена составило +0,71 в мае и снизилось до -0,17 в июне.

В период стабилизации значения внутреннего водообмена изменялись незначительно: от -0,03 (июль) до +0,06 (август), а в период зимней сработки значения водообмена колебались в пределах 0 (рис. 9).

В 1966 г. (рис. 10) максимальные величины водообмена пришлись на апрель. На участке Пермь – Оханск максимальное значение водообмена составило +0,78 и снизилось до -0,16 в июне, что явилось следствием работы Камской ГЭС, так как это верхний участок нижнего бьефа. На остальных

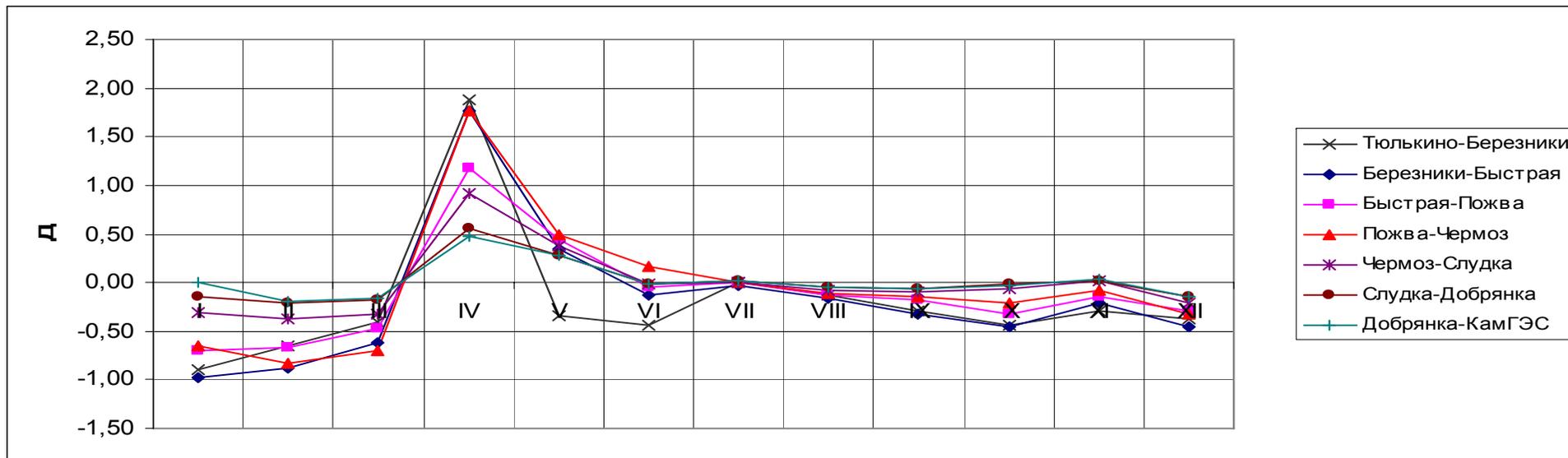


Рис.3. Изменение коэффициента внутреннего водообмена (D) Камского водохранилища за 1967 г.

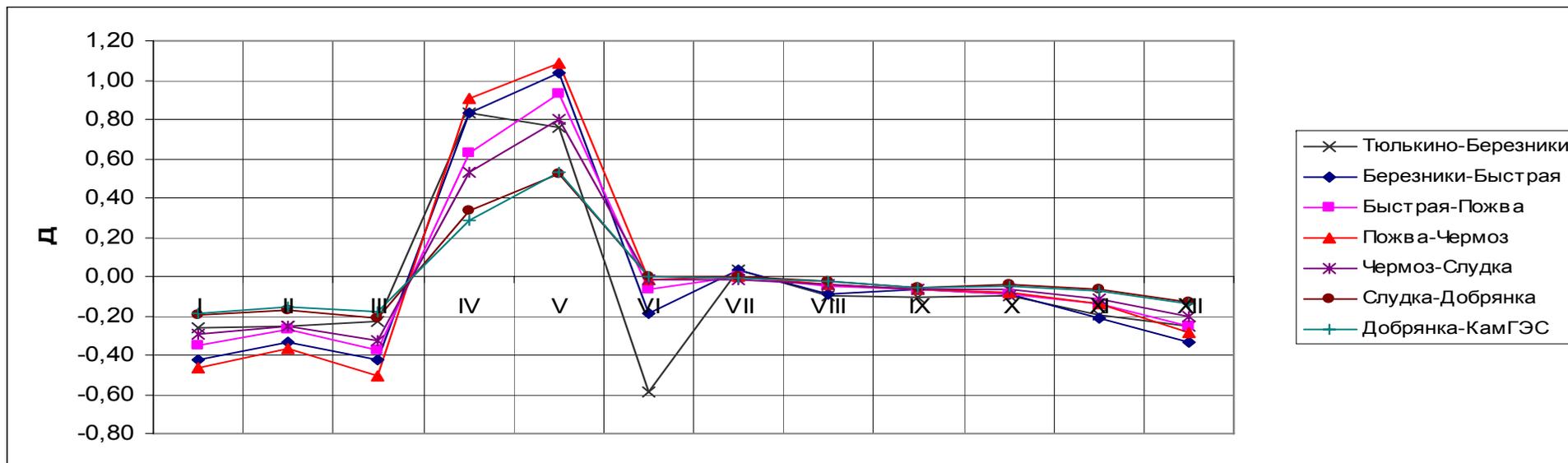


Рис.4. Изменение коэффициента внутреннего водообмена (D) Камского водохранилища за 1968 г.

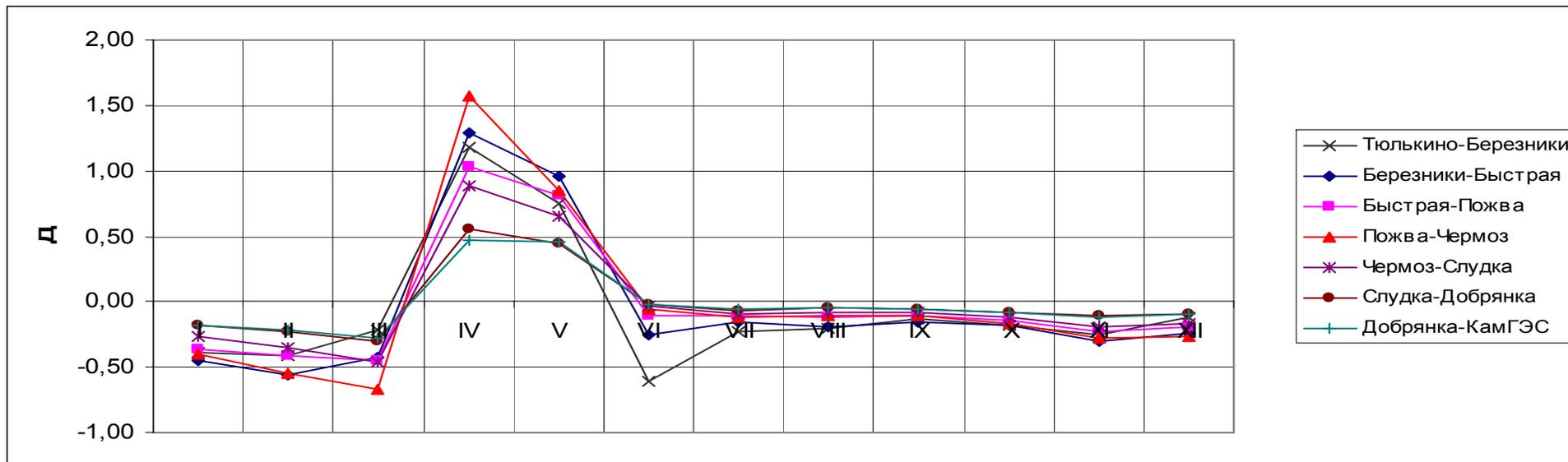


Рис.5. Изменение коэффициента внутреннего водообмена (D) Камского водохранилища за 1974 г.

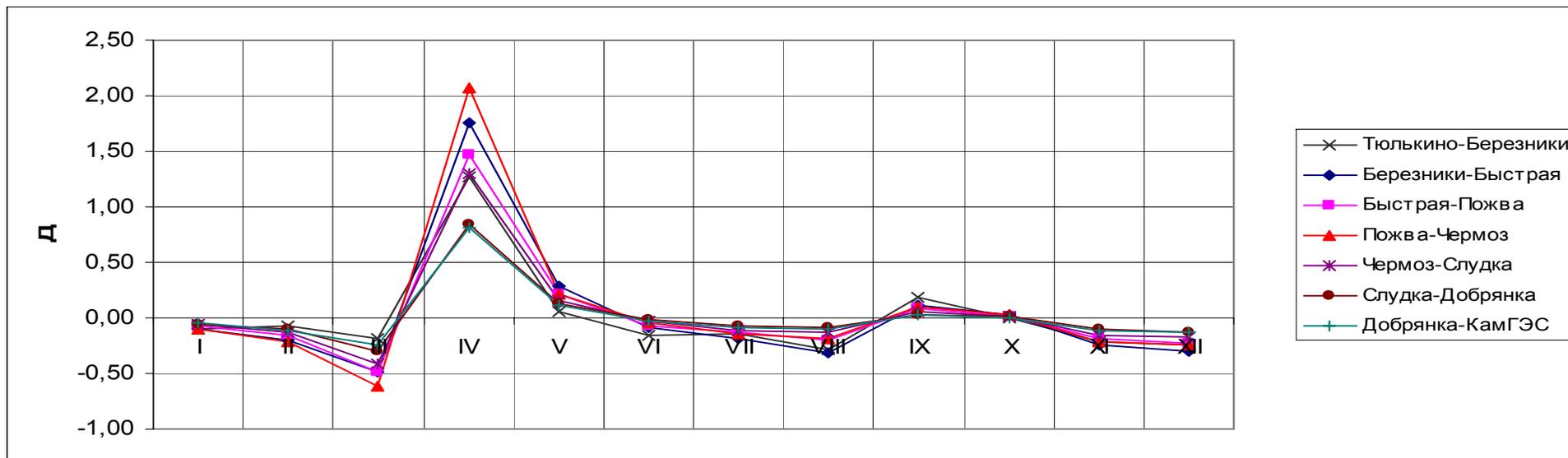


Рис.6. Изменение коэффициента внутреннего водообмена (D) Камского водохранилища за 1975 г.

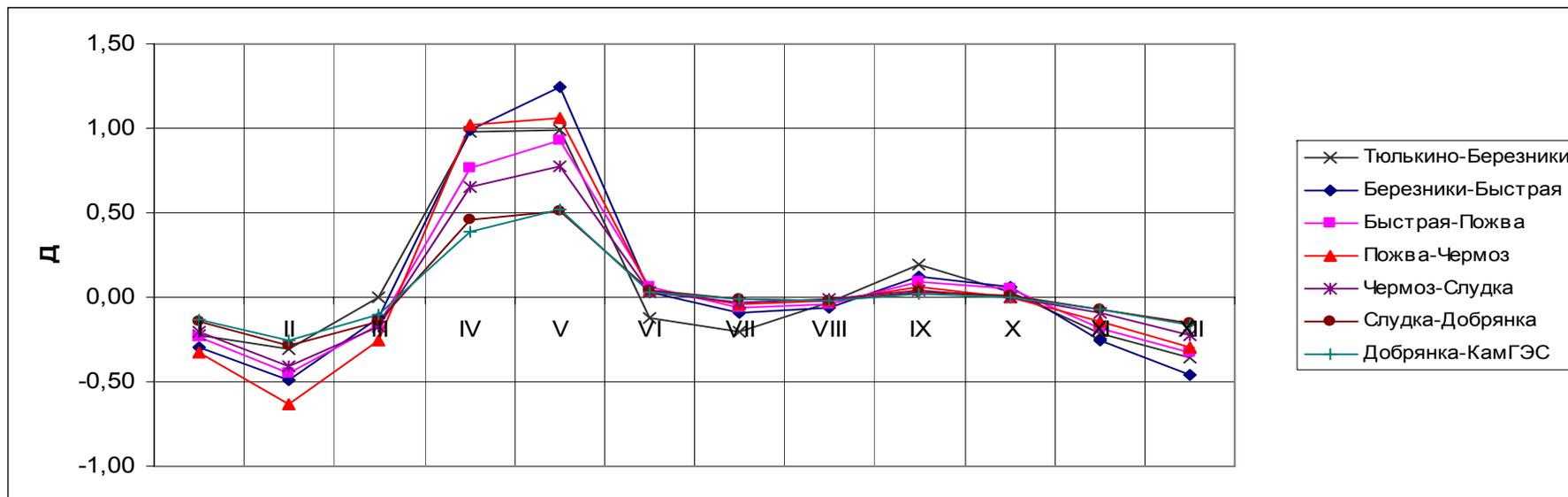


Рис. 7. Изменение коэффициента внутреннего водообмена (D) Воткинского водохранилища за 1978 г.

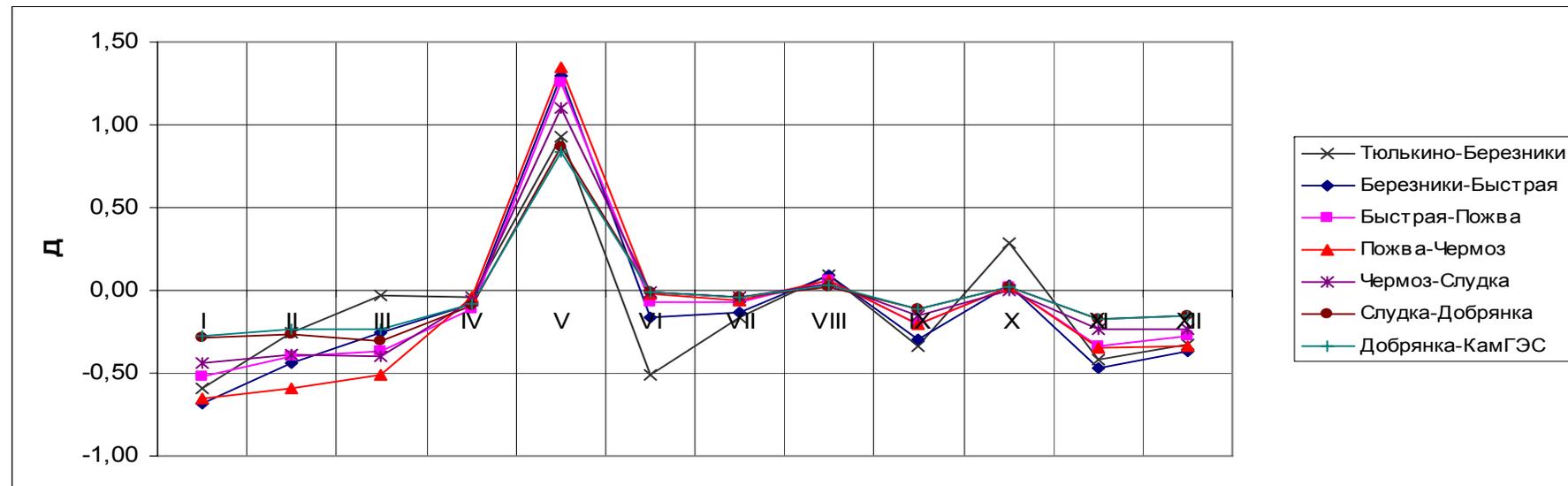


Рис. 8. Изменение коэффициента внутреннего водообмена (D) Воткинского водохранилища за 1979 г.

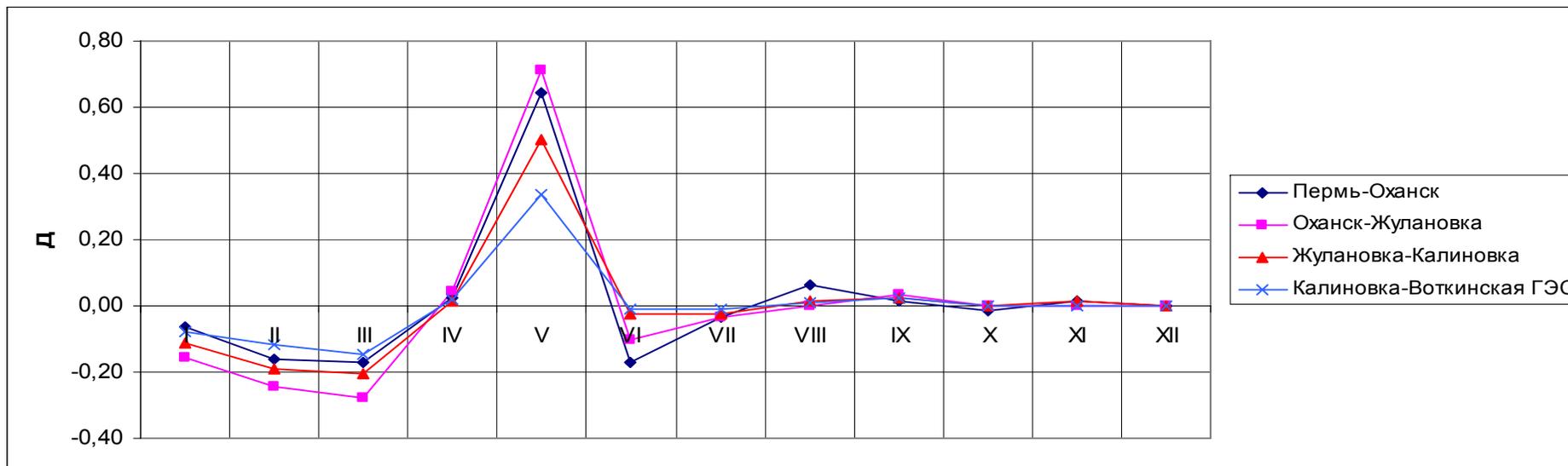


Рис. 9. Изменение коэффициента внутреннего водообмена (D) Воткинского водохранилища за 1965 г.

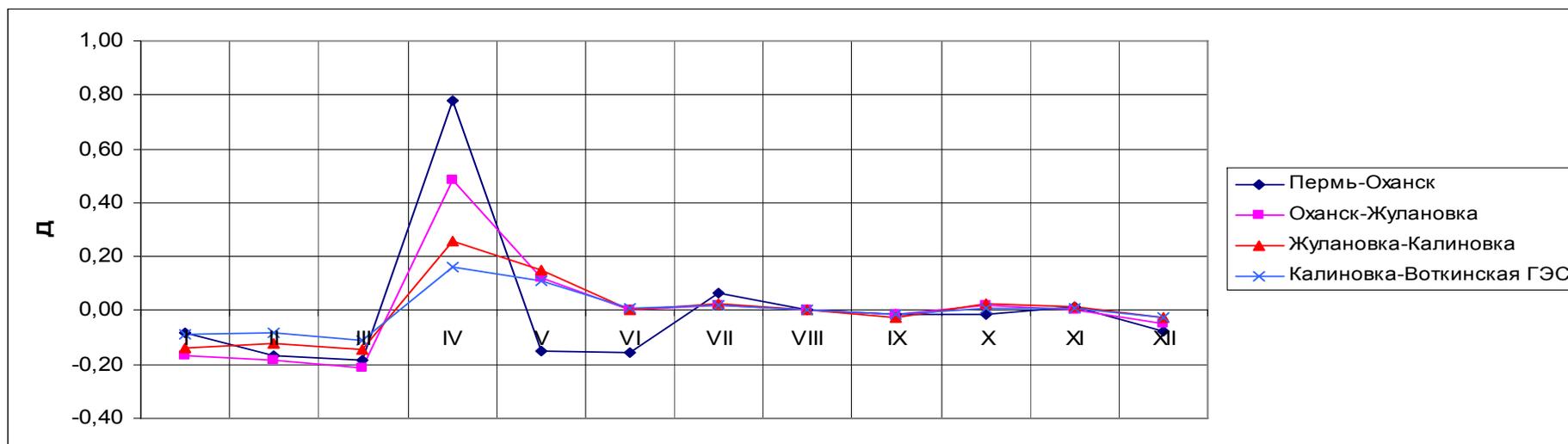


Рис. 10. Изменение коэффициента внутреннего водообмена (D) Воткинского водохранилища за 1966 г.

участках коэффициент водообмена снижался не так резко: от +0,49 до 0. В период летне-осенней стабилизации и зимней сработки значения водообмена незначительно колебались около 0. В маловодном 1967 г. (рис. 11) в весенний период максимальная величина водообмена была равна +0,34 (апрель), и постепенно снизилась до -0,02 (июль). Такое плавное снижение связано с растянутым половодьем, что подтверждает изменение расходов воды через Камскую ГЭС. В период летне-осенней стабилизации значения коэффициентов менялись незначительно и колебались в пределах от 0 в августе до -0,11 в ноябре. В декабре этого года наблюдались несвойственные для этого периода положительные значения, которые изменялись от +0,05 до +0,11, что связано с увеличением сброса воды через Камскую ГЭС. В период с января по март, соответствующий фазе зимней сработки, величина водообмена изменялась от -0,05 (январь) до -0,28 (март).

В 1968 г. максимальные значения водообмена от +0,22 до +0,61 пришли на май. После спада половодья значения коэффициента обмена вод снизились до -0,23. В период летне-осенней стабилизации наблюдались 2 небольших пика в связи с паводками. В августе величина внутреннего водообмена повысилась до +0,03, а в октябре до +0,11. В период зимней межени с января по март значения водообмена изменялись от 0 до -0,33 (рис. 12).

В 1969 г. внутригодовой ход внутреннего водообмена также соответствовал трем фазам. Максимальные значения совпадали с пиком половодья в апреле и составляли +0,70. В июне наблюдалось увеличение внутреннего водообмена в приплотинном участке, а в июле был спад, что связано с работой Камской ГЭС.

На остальных участках с июля по декабрь значения водообмена менялись мало, только в октябре был небольшой подъем до +0,03, связанный с увеличением числа осадков, выпавших на зеркало водоема. В период зимней сработки в марте наблюдались минимальные значения обмена вод: -0,30. В 1970, 1971, 1972 гг. внутригодовой ход практически был одинаковым, исключением является лишь 1971 г., в котором максимальные значения наблюдались в мае и равнялись +0,50 (в 1970 и 1972 – в апреле и составили соответственно +0,61 и +0,63) и постепенно снизились к июлю в связи с растянутым половодьем. Во все эти годы в июне–июле значения водообмена на участке Пермь – Оханск были ниже, чем на других участках.

С июля по ноябрь величины водообмена колебались около 0 в обе стороны. В 1970 г. в ноябре было некоторое повышение в связи с увеличением осадков. В марте во все годы значения минимальны и отрицательны, они не опускались ниже -0,28.

В 1973 г. в январе отмечались несвойственные для этого месяца положительные значения водообмена (до +0,15) в приплотинном участке вследствие малого сброса воды через Камскую ГЭС. К марту эти величины снизились до минимальных во внутригодовом ходе и составили -0,27. В апреле коэффициент внутреннего водообмена был максимальным и равнялся +0,62. С июня по август значения водообмена изменялись незначительно: от 0 до -0,05. В сентябре значения снизились до -0,18, так как сброс через Камскую ГЭС был минимальным; а октябре коэффициент водообмена увеличился до +0,18 в связи с большим поступлением осадков и увеличением сброса через ГЭС. В декабре величины обмена вод также возросли до +0,17 вследствие увеличения осадков и работы ГЭС.

В январе 1974 г. на участке Пермь – Оханск величина водообмена была положительной и равнялась +0,05, на остальных же участках ход коэффициента водообмена соответствовал фазе зимней сработки. В апреле максимальное значение равнялось +0,52. В мае эти значения снизились до +0,37, что связано с растянутым половодьем. В июне коэффициент водообмена в приплотинном участке составил -0,38 в связи с увеличением осадков. До сентября значения оставались отрицательными и изменялись от -0,21 до -0,04. С октября по декабрь значения были положительными и оставались в пределах от 0 до +0,02 (рис. 13).

В 1975 г. (рис. 14) в период с января по март значения изменялись от -0,05 до -0,16. В апреле водообмен увеличился до +0,29, а в мае максимальное значение составило +0,35. В июне значения снизились до -0,04, а в июле наблюдался небольшой пик (до +0,05) в связи с летними паводками. С августа коэффициент водообмена с 0 снизился до -0,21 в октябре, что связано с каскадным положением. В декабре показатель водообмена упал до -0,02, так как уменьшился сброс через Воткинскую ГЭС.

В 1976 г. величины водообмена в период зимней сработки изменялись от +0,04 до -0,04, но не были минимальными. С марта значения обмена вод увеличивались к маю, максимальное значение в котором составило +0,54. Затем значения резко снизились – в июне до -0,17. С июля по октябрь коэффициент водообмена изменялся от -0,14 до -0,03, что соответствовало периоду летне-осенней

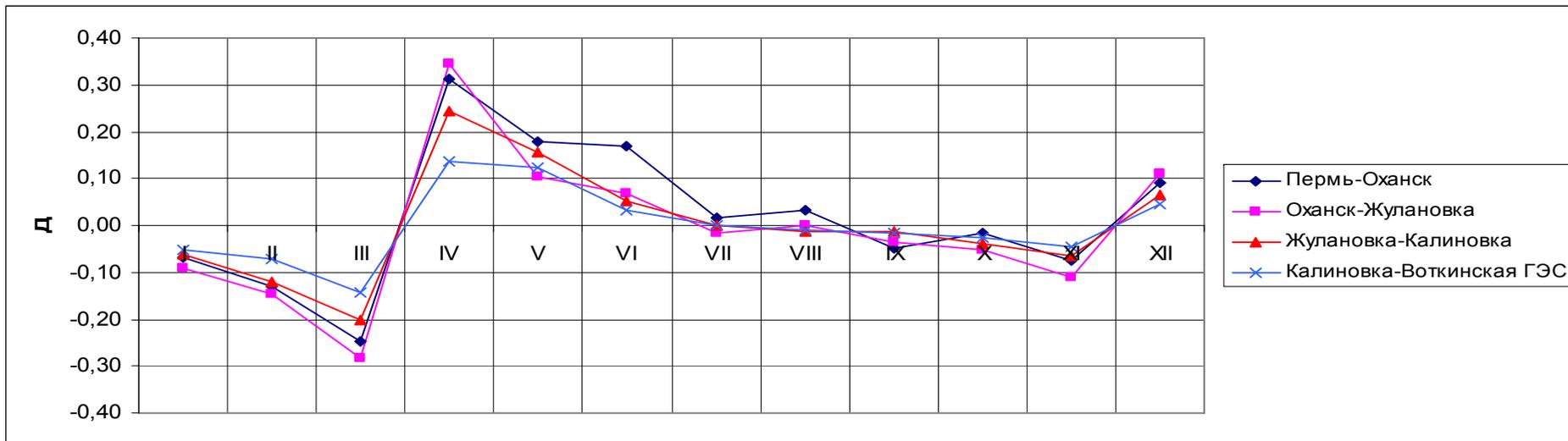


Рис. 11. Изменение коэффициента внутреннего водообмена (D) Воткинского водохранилища за 1967 г.

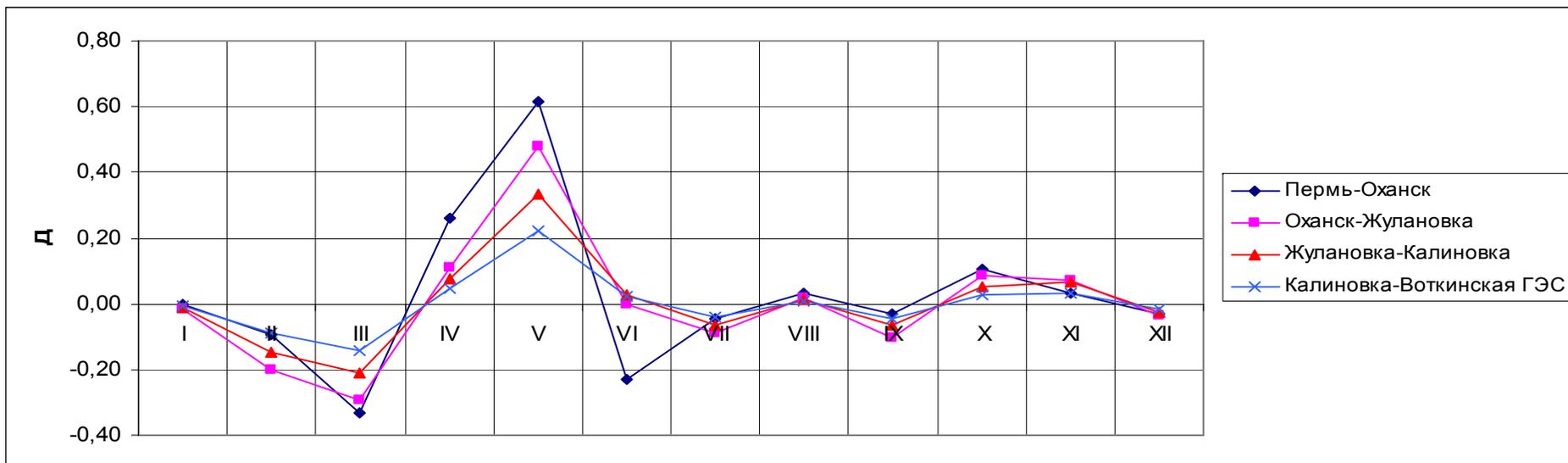


Рис. 12. Изменение коэффициента внутреннего водообмена (D) Воткинского водохранилища за 1968 г.

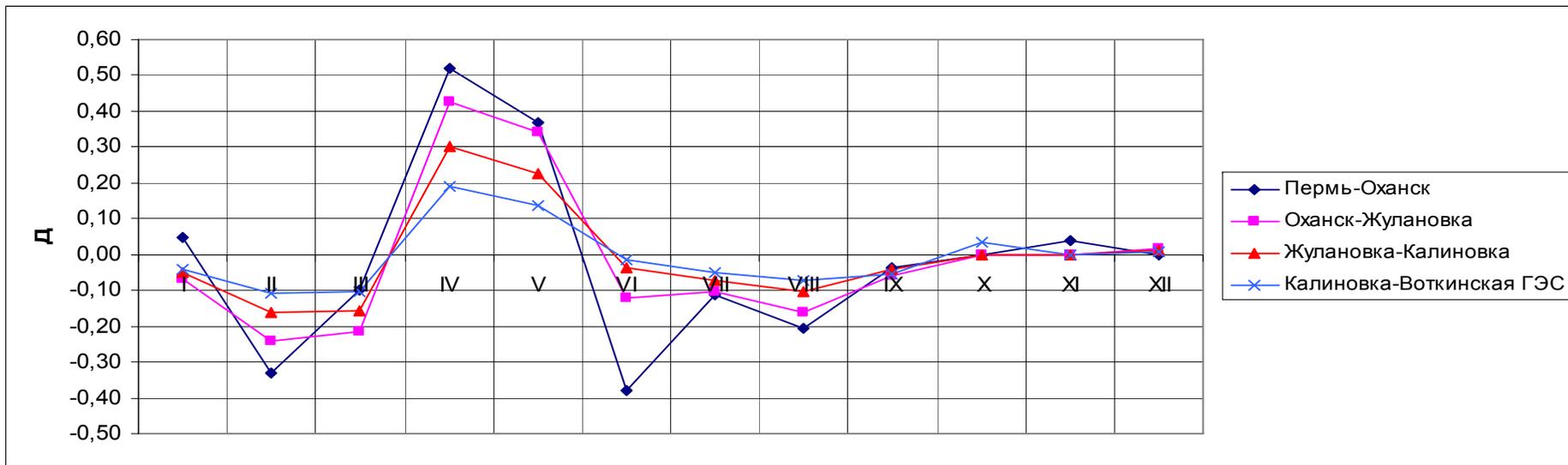


Рис. 13. Изменение коэффициента внутреннего водообмена (D) Воткинского водохранилища за 1974 г.

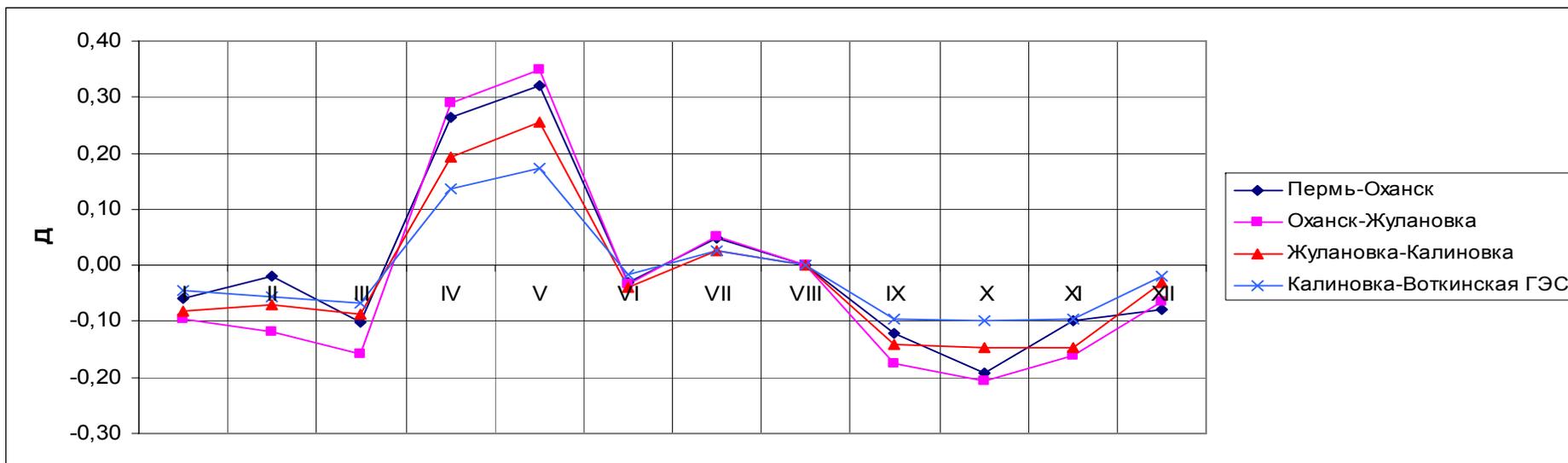


Рис. 14. Изменение коэффициента внутреннего водообмена (D) Воткинского водохранилища за 1975 г.

стабилизации. В ноябре величины водообмена снизились до минимального значения в этом году (-0,26), к декабрю коэффициент увеличился до +0,02, так как сброс через ГЭС уменьшился.

В 1977 г. в связи с особенностью года увеличение коэффициента начинается с марта. Максимальные значения в мае достигли +0,48, а затем снизились до -0,10 в июне. С июля по август значения оставались отрицательными. С сентября по ноябрь величины водообмена колебались от -0,01 до +0,04 вследствие увеличения осадков в этот период. В декабре коэффициент водообмена был минимальным и составил -0,17, что связано с увеличением сброса через ГЭС.

В 1978 г. в марте значения водообмена положительные. В апреле они несколько снизились и достигли своего максимума (+0,65) в мае. К июлю значения снизились до -0,12. В сентябре на участке Пермь – Оханск наблюдается небольшое увеличение коэффициента до +0,08, а в декабре на всех участках значения водообмена снижаются до -0,12 (рис. 15).

В многоводном 1979 г. максимальная величина обмена вод в мае составила + 0,62 и резко снизилась до -0,32 в июне, что связано с режимом работы Камской ГЭС. В летне-осенний период наблюдались как положительные, так и отрицательные значения коэффициента внутреннего водообмена. В период зимней сработки показатель внутреннего водообмена отрицателен и минимален в годовом аспекте (рис. 16). Величина водообмена снизилась с -0,03 (ноябрь) до -0,39 (февраль).

В 1980 г. в январе на участке Пермь – Оханск коэффициент водообмена был положительным и составил +0,12, в феврале он снизился до -0,30. На остальных участках его значения были отрицательными; к марту они увеличились, так как уменьшился сброс через Камскую ГЭС. Максимальные значения в апреле достигли +0,62 и постепенно снизились до -0,06 в июне. В период стабилизации значения водообмена колебались в пределах от 0 до -0,07. В октябре наблюдалось небольшое повышение водообмена до +0,07 в связи с осадками. В ноябре значения водообмена снизились до -0,18, а в декабре снова увеличились до +0,08 вследствие неравномерного сброса воды через Воткинскую ГЭС.

В 1981 и 1982 гг. внутригодовой ход коэффициента внутреннего водообмена практически совпадал, но был ряд отличий. Так, в 1981 г. с января по март его значения снижались с -0,04 до -0,27, а в 1982 г. в феврале наблюдалось увеличение водообмена до +0,02. Максимальные значения в обоих годах приходились на май. Так, в 1981 г. максимальная величина водообмена составила +0,74, а в 1982 г. +0,47. В июне 1981 г. в приплотинном участке коэффициент водообмена был минимальным и составил -0,37. К июлю значения на всех участках 1981 г. достигли -0,23, а в 1982 г. -0,08. С августа по ноябрь 1981 г. коэффициент водообмена изменился с +0,06 до -0,11, небольшие увеличения наблюдались в период паводков. В декабре значения водообмена снизились до -0,23. В 1982 г. минимальные значения водообмена наблюдались в сентябре и составляли -0,14. В октябре–декабре коэффициент обмена вод менялся незначительно: от -0,06 до 0. Разница внутригодового хода коэффициента водообмена в эти два года была обусловлена разной водностью лет и разным сбросом воды через Камскую ГЭС. В 1983 г. в феврале значения водообмена были положительными и достигали +0,15 в связи с минимальным сбросом через Камскую ГЭС. К марту значения снизились до -0,14. Максимальное значение было в апреле и составило +0,57. К маю коэффициент резко снизился до -0,07. В период стабилизации с июля по сентябрь значительных изменений не было. В октябре величины обмена вод увеличились до +0,20. В декабре установились отрицательные значения водообмена.

В 1984 г. в январе наблюдались положительные значения (до +0,13), резко снизились они в феврале (до -0,42). Максимальные значения (до +0,61) были в мае, затем они снизились в июне до -0,05. С июля по октябрь наблюдались небольшие пики в период паводков. Значения достигали в октябре +0,16. В декабре эти значения были -0,26 в связи с неравномерной работой Камской ГЭС.

### **Изменение коэффициента внутреннего водообмена по длине водоемов**

На Камском водохранилище в 1964 г. в феврале коэффициент водообмена изменялся от -0,45 на верхнем участке до -0,28 на нижнем. На участках Быстрая – Березники и Пожва – Чермоз значения водообмена составили -0,62 и -0,68 соответственно. В период весеннего наполнения в мае величины водообмена уменьшились вниз по водохранилищу с +1,56 на участке Березники – Быстрая до +0,68 в районе плотины Камской ГЭС. В районе выклинивания подпора коэффициент водообмена был равен +1,13, а в июне снизился до -0,71. В период летне-осенней стабилизации значения водообмена уменьшаются от верхнего участка к плотине Камской ГЭС. В октябре во время паводков величины

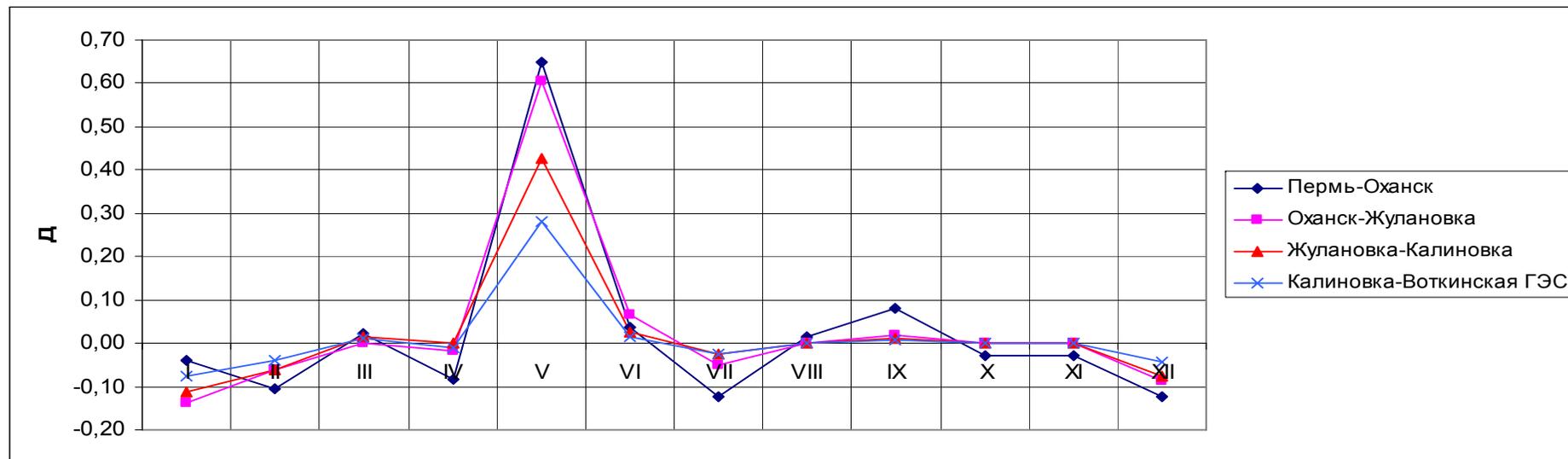


Рис. 15. Изменение коэффициента внутреннего водообмена (D) Воткинского водохранилища за 1978 г.

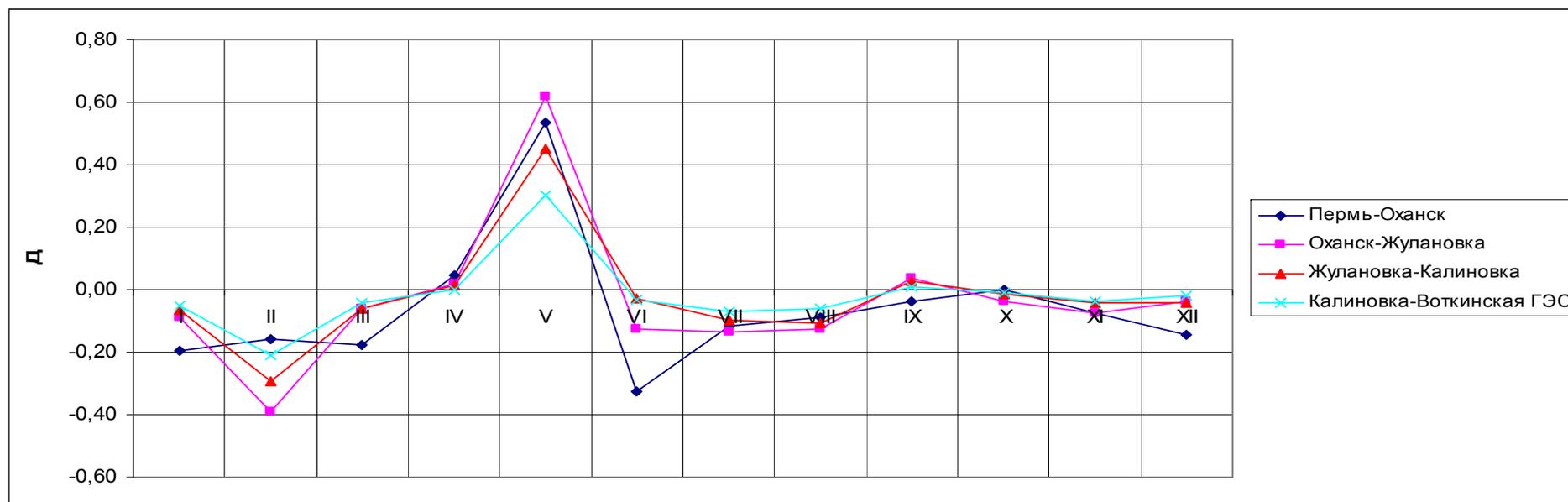


Рис. 16. Изменение коэффициента внутреннего водообмена (D) Воткинского водохранилища за 1979 г.

водообмена были положительными и уменьшались вниз по длине водоема с +0,21 до +0,03.

В 1965 г. во время зимней сработки коэффициент водообмена на участке Пожва – Чермоз был самым низким. На остальных участках значения водообмена уменьшались при приближении к плотине Камской ГЭС. Максимальные величины водообмена в мае снизились с +1,16 на участке Березники – Быстрая до +0,65 на участке Добрянка – КамГЭС. На участке выклинивания подпора водообмен был равен +0,90. В период летне-осенней стабилизации значения водообмена уменьшались при приближении к плотине Камской ГЭС.

В маловодном 1967 г. в феврале коэффициент водообмена уменьшился с -0,87 на участке Березники – Быстрая до -0,20 на нижнем участке. В апреле в верховьях водоема водообмен был равен +1,88; на приплотинном участке +0,47. К июню коэффициент водообмена на участке Тюлькино – Березники снизился до -0,44. В период летне-осенней стабилизации значения водообмена уменьшаются от верхнего участка к нижнему, так, например, в августе эти значения были -0,16 и -0,04 соответственно.

В многоводном 1979 г. минимальные значения водообмена были отмечены в январе на участке Березники – Быстрая и составили -0,68. В феврале коэффициент водообмена изменялся в пределах от -0,24 (Добрянка-КамГЭС) до -0,59 (Пожва – Чермоз). В мае максимальные значения водообмена изменялись в пределах от +1,34 (Пожва – Чермоз) до +0,84 (Добрянка – КамГЭС). В районе выклинивания подпора водообмен был равен +0,93, в июне он снизился до -0,51. В июле показатель водообмена колебался около 0. В остальные месяцы коэффициент водообмена уменьшался при приближении к Камской ГЭС. Так, например, в сентябре значения водообмена изменились от -0,34 на верхнем участке до -0,12 на нижнем.

В период весеннего наполнения в 1968, 1969, 1970, 1971, 1973, 1974, 1975, 1979, 1982, 1984 гг. максимальные значения водообмена были на участке Пожва – Чермоз. Также в эти годы наблюдалось повышение водообмена на участке Березники – Быстрая. Коэффициент водообмена уменьшался при движении от центрального участка к плотине Камской ГЭС. Во время летне-осенней стабилизации значения водообмена были отрицательными и уменьшались от верхнего участка к нижнему, а во время паводков показатели водообмена были положительными и уменьшались при приближении к плотине Камской ГЭС.

В 1972, 1977, 1980 гг. максимальные значения водообмена в апреле были на участке Тюлькино – Березники, затем снижались в районе участка Быстрая – Пожва. На участке Пожва – Чермоз коэффициент водообмена вновь увеличивался, а на приплотинном участке снова снижался. В 1972 г. в период стабилизации величины водообмена уменьшаются по длине водоема в направлении плотины Камской ГЭС. В 1977, 1980 гг. в мае коэффициент водообмена на участке Тюлькино – Березники был меньше, чем на других участках. В октябре–ноябре 1977 г. значения водообмена в районе выклинивания подпора были положительными. В 1980 г. в сентябре в период паводков коэффициент водообмена снижался от участка Березники – Быстрая к плотине Камской ГЭС, а на верхнем участке он был равен 0, так как изменения объемов не происходило.

В 1976, 1978, 1981 гг. в период наполнения водохранилища максимальные значения водообмена были на участке Березники – Быстрая. В 1978 г. в сентябре–октябре во время паводков коэффициент водообмена изменился от +0,19 на верхнем участке до 0 на нижнем участке. В 1981 г. в октябре–декабре значения водообмена на участке Пожва – Чермоз были ниже, чем на других участках.

В 1983 г. максимальный коэффициент водообмена был в апреле на участке Чермоз – Слудка и составил +1,59. В мае на участке Тюлькино – Березники в связи с резким уменьшением объема воды величина водообмена была равна -0,27, на остальных участках значения водообмена были положительными. В период паводков в октябре коэффициент водообмена изменился от +0,22 на верхнем участке до +0,08 на нижнем.

Проанализировав изменение коэффициента внутреннего водообмена по длине Камского водохранилища, можно отметить, что в целом отмечается тенденция уменьшения величин внутреннего водообмена от верховьев водоема к плотине Камской ГЭС. Также во все годы в этот период отмечается увеличение водообмена на участке Пожва – Чермоз, что связано с поступлением вод рек Иньвы и Косьвы и соответственно с усилением их обмена.

В период летне-осенней стабилизации значения водообмена отрицательные и уменьшаются по длине водохранилища в направлении плотины Камской ГЭС. Во время паводков величины водообмена положительные и также снижаются от верхнего участка к нижнему.

Во все годы на Камском водохранилище в период зимней сработки коэффициент водообмена выше на участке Пожва – Чермоз и происходит уменьшение значений водообмена от участка

Березники – Быстрая к плотине Камской ГЭС. На участке Тюлькино – Березники величины водообмена в это время соответствуют значениям на приплотинных участках.

На Воткинском водохранилище в 1965 и 1966 гг. в период зимней сработки (март) значения водообмена изменились от -0,28 на верхнем участке до -0,14 на участке Калиновка – Воткинская ГЭС (1965) и от -0,22 до -0,08 в 1966 г. В период наполнения, в 1965 г. (май) и в 1966 г. (апрель), максимальные значения наблюдались на участке Оханск – Жулановка и снизились по длине водохранилища от +0,71 до +0,34 (1965 г.) и от +0,78 до +0,16 (1966 г.). В июне наибольшие значения водообмена, наоборот, были у плотины Камской ГЭС и равнялись в 1965 г. -0,17, в 1966 г. -0,16, а наименьшие – у плотины Воткинской ГЭС: -0,01 и +0,01 соответственно. В остальные месяцы величины водообмена изменялись мало.

В минимальном по водности 1967 г. в период зимней сработки величины водообмена изменялись от -0,25 на верхнем участке у плотины Камской ГЭС до -0,28 на участке Оханск – Жулановка и снизились до -0,14 на нижнем участке. В период наполнения значения коэффициента обмена вод на участке Оханск – Жулановка были несколько выше, чем на других участках и снизились с +0,34 до +0,14 у плотины Воткинской ГЭС. В период летне-осенней стабилизации значения водообмена на участке Пермь – Оханск незначительно превышали эти же значения на других участках в связи с работой Камской ГЭС. В августе эти величины изменились от -0,03 в верхнем участке до +0,01 на нижнем. В декабре на участке Оханск – Жулановка коэффициент водообмена увеличился до +0,11 и снизился к нижнему участку до +0,05.

В 1968 г. в период зимней сработки отмечалось уменьшение показателя водообмена от верхнего участка к плотине Воткинской ГЭС. Так, в марте коэффициент водообмена изменился от -0,33 на участке Пермь – Оханск до -0,14 на участке Калиновка – Воткинская ГЭС. В мае максимальные значения на этом участке снизились от +0,61 до +0,22. В сентябре значения водообмена на участке Оханск – Жулановка были ниже, чем на других участках.

В 1969 г. в период зимней сработки значения водообмена на участке Оханск – Жулановка были выше, чем на остальных участках и изменялись от -0,30 до -0,08 к участку Калиновка – Воткинская ГЭС. В период наполнения значения водообмена снизились по длине водохранилища от +0,70 до +0,18. В мае коэффициент водообмена на участке Пермь – Оханск был меньше, чем на других участках. В июле наибольшие значения водообмена у плотины Камской ГЭС равнялись -0,14, а наименьшие у плотины Воткинской ГЭС -0,02. В остальных месяцах величины водообмена изменялись мало.

В 1970, 1971, 1972 гг. пространственное изменение водообмена было аналогичным. Так, в период зимней сработки значения водообмена на участке Оханск – Жулановка были выше, чем на остальных участках, и уменьшались к нижнему участку. В период весеннего наполнения величины обмена вод снижались от верхнего участка к нижнему. В июне–июле коэффициент внутреннего водообмена на участке Пермь – Оханск были выше, чем на других участках. В 1970 г. в ноябре в период паводков коэффициент водообмена снижался от плотины Камской ГЭС к плотине Воткинской ГЭС от +0,08 до +0,02, а в декабре от -0,06 до -0,02. В 1971 и 72 гг. с октября по декабрь значения водообмена изменялись незначительно.

В 1973 г. значения водообмена в период зимней сработки уменьшаются от плотины Камской ГЭС к плотине Воткинской ГЭС. В апреле максимальное значение водообмена +0,64 было на верхнем участке и снизилось до +0,34 на нижнем участке. В сентябре коэффициент водообмена на участке Пермь – Оханск был ниже, чем на других участках. В период паводков величины водообмена уменьшались от верхнего участка к нижнему. В декабре наблюдалось увеличение коэффициента на участке Оханск – Жулановка.

В 1974 г. в феврале величина водообмена снизилась с -0,33 на участке Пермь – Оханск до -0,11 у плотины Воткинской ГЭС. В весенний период коэффициент изменяется от верхнего участка к нижнему от +0,52 до +0,19. С октября по декабрь величины водообмена менялись незначительно, в октябре был выше коэффициент на нижнем участке, а в ноябре на участке Оханск – Жулановка.

В 1975 г. в период зимней сработки значения водообмена в феврале на участке Пермь – Оханск были ниже, чем на остальных участках, и с участка Оханск – Жулановка значения водообмена к плотине Воткинской ГЭС уменьшались. В период наполнения в апреле–мае на участке Оханск–Жулановка коэффициент водообмена превышал остальные значения и уменьшался по длине водоема к нижнему участку +0,35 до +0,17. В период паводков в июле–августе величины водообмена на верхнем и нижнем участке были примерно одинаковые. В остальные месяцы значения водообмена на верхнем участке были больше и уменьшались в сторону Воткинской ГЭС.

В 1976 г. значения водообмена на верхнем участке были меньше, чем на участке Оханск – Жулановка, далее к нижнему участку снова происходило уменьшение коэффициента водообмена. В период наполнения величины водообмена уменьшаются по длине водохранилища. В мае максимальные значения наблюдались на участке Оханск – Жулановка и уменьшились у плотины Воткинской ГЭС с +0,54 до +0,27. В остальные месяцы коэффициент водообмена уменьшается от верхнего участка к нижнему.

В 1977 г. в феврале водообмен уменьшается от нижнего участка к верхнему. С наполнением водохранилища коэффициент водообмена у плотины Камской ГЭС равнялся +0,39 и снизился до +0,24 у плотины Воткинской ГЭС. В летние месяцы значения водообмена изменялись от -0,11 на верхнем участке до -0,03 на нижнем. С сентября по ноябрь в период паводков величины водообмена уменьшались от верхнего участка к нижнему с небольшой амплитудой, а в декабре значения изменились от -0,17 на верхнем участке до -0,07 на нижнем.

В 1978 г. значения водообмена уменьшаются от верхнего участка к плотине Воткинской ГЭС. В июне значения водообмена на участке Оханск – Жулановка были несколько выше, чем на других участках.

В многоводном 1979 г. в период зимней сработки (февраль) значения водообмена на участке Пермь – Оханск равнялись -0,16. К участку Оханск – Жулановка коэффициент водообмена повысился до -0,39, а затем снизился до -0,21 к плотине Воткинской ГЭС. В мае максимальные значения были на участке Оханск – Жулановка и снизились к нижнему участку от +0,62 до +0,30. В период летне-осенней стабилизации (июль) величины водообмена в верхней части водохранилища были -0,12, а в приплотинной -0,07.

В 1980 г. в январе на участке Пермь – Оханск коэффициент водообмена был равен +0,12, так как увеличился объем воды к концу месяца. На остальных участках величины обмена были отрицательные. В феврале значения водообмена уменьшились с -0,30 на верхнем участке до -0,01 на нижнем. В период наполнения коэффициент водообмена снизился у плотины Воткинской ГЭС от +0,62 до +0,15. В ноябре и декабре значения водообмена на верхнем участке были несколько меньше, чем на других участках.

В 1981 г. в период зимней сработки на участке у плотины Камской ГЭС значения водообмена были ниже, чем на других участках. Затем от участка Оханск – Жулановка к плотине Воткинской ГЭС коэффициент водообмена в марте снизился с -0,27 до -0,13. В мае величины обмена вод уменьшились с +0,74 на верхнем участке до +0,26 на нижнем. В октябре–ноябре изменения объемов на участке Пермь – Оханск не происходило, поэтому коэффициент водообмена был ниже, чем на остальных участках.

В 1982 г. значения водообмена по длине водохранилища также уменьшались от верхнего участка к нижнему. Так, в период зимней сработки коэффициент водообмена снизился с -0,04 до -0,01. В период наполнения (май) на участке Пермь – Оханск водообмен равнялся +0,35, затем увеличился к участку Оханск – Жулановка до +0,47. К плотине Воткинской ГЭС значения водообмена уменьшились до +0,25.

В 1983 г. в феврале величины водообмена были положительными и изменились с +0,15 на верхнем участке до +0,03 на нижнем участке. В апреле максимальные значения водообмена уменьшились по длине водохранилища к плотине Воткинской ГЭС с +0,57 до +0,25. В октябре в период паводков коэффициент водообмена изменился от +0,20 на участке Пермь – Оханск до +0,10 на участке Калиновка – Воткинская ГЭС.

В 1984 г. в связи со спецификой работы Камской ГЭС значения водообмена в январе были положительными, а феврале уменьшились с -0,42 на верхнем участке до -0,17 на нижнем. В период весеннего наполнения коэффициент на участке Пермь – Оханск был равен +0,61 и снизился до +0,27 к плотине Воткинской ГЭС. В период паводков в октябре величины водообмена были положительные, а в декабре изменились от верхнего участка к нижнему от -0,26 до -0,05.

Проанализировав изменение коэффициента внутреннего водообмена по длине Воткинского водохранилища, можно утверждать, что в целом отмечается тенденция уменьшения величин внутреннего водообмена от Камской плотины к плотине Воткинской ГЭС во время весеннего наполнения. Но в 1965, 1967, 1975, 1976, 1977, 1979, 1982 гг. максимальные значения наблюдались на участке Оханск – Жулановка в мае в период весеннего наполнения и увеличения боковой приточности (исключением является маловодный 1967 г., в котором максимальные значения отмечались в апреле).

Практически во все годы в период зимней сработки (февраль) на участке Оханск – Пожва значения водообмена были выше, чем в верхних участках. В 1975, 1976, 1979, 1981 гг. в феврале

коэффициент внутреннего водообмена на участке Пермь – Оханск был ниже, чем на остальных участках. Минимальные отрицательные значения в этом месяце (кроме 1971, 1973, 1974, 1978, 1983, 1984 гг.) наблюдались на участке Оханск – Жулановка, что связано с большим изменением объемов воды и различиями в морфометрии участков.

В период летне–осенней стабилизации значения обмена вод по длине водохранилища меняются незначительно, только в период дождевых паводков на верхнем участке значения водообмена увеличиваются относительно других участков.

### **Сравнительная характеристика внутреннего водообмена Камского и Воткинского водохранилищ**

На основании анализа изменения коэффициентов внутреннего водообмена Камского и Воткинского водохранилищ были сделаны следующие выводы и наблюдения:

1. Изменение коэффициентов водообмена по фазам:

- в период зимней сработки показатель внутреннего водообмена отрицателен и минимален в годовом аспекте;
- в период весеннего наполнения величины водообмена максимальные и положительные;
- в период летне–осенней стабилизации значения коэффициентов колеблются в обе стороны от нулевого значения с некоторым преобладанием отрицательных величин.

2. Изменение величин водообмена в зависимости от водности года: в многоводный год интенсивность водообмена выше, чем в маловодный год.

3. Внутригодовой ход водообмена на Воткинском водохранилище зависит от режима работы Камской и Воткинской ГЭС.

4. Амплитуда колебаний показателя внутреннего обмена вод на Воткинском водохранилище существенно меньше, чем на Камском, что связано с его каскадным положением.

Сравнивая пространственное изменение внутреннего водообмена в период зимней сработки на обоих водохранилищах, можно заметить, что в целом наблюдается тенденция уменьшения показателей обмена вод от верховьев водоема к плотине. На Камском водохранилище минимальные значения в этот период наблюдаются в центральной части водоема. На Воткинском водохранилище в большинстве лет минимальные величины водообмена также приходились на центральную часть водоема.

При весеннем наполнении коэффициент водообмена уменьшается от верхних участков к нижним. Для обоих водохранилищ характерно некоторое увеличение показателей водообмена на центральных участках, что связано с увеличением боковой приточности.

В период летне–осенней стабилизации уровня водообмен может как возрастать, так и уменьшаться к плотине, сами эти изменения невелики.

Изменение показателя внутреннего водообмена по длине Воткинского водохранилища имеет более четкую тенденцию, по сравнению с Камским, во все фазы водного режима водоема. Последнее связано с более простой морфометрией водоема и с последовательным уменьшением всех основных гидродинамических характеристик водного режима от плотины Камской к плотине Воткинской ГЭС.

### **Библиографический список**

1. *Буторин Н.В., Литвинов А.С.* Расчет коэффициента турбулентного обмена в Рыбинском водохранилище // Труды ИБВВ АН СССР. 1968. Вып.16(19). С.250-258.
2. *Верболов В.И.* О коэффициентах горизонтального макротурбулентного обмена в прибрежной зоне Южного Байкала // Труды Лимнол. ин-та Сиб.отд. АН ССР. 1970. Вып.14(34). С.122-132.
3. *Девяткова Т.П.* Проточность как специфическая черта гидрологического режима водохранилищ // Методы изучения расчетов и прогнозов водных и климатических ресурсов/ Перм. ун-т. Пермь, 1978. С.26-33.
4. *Девяткова Т.П., Китаев А.Б.* Интенсивность изменения водных масс Камского и Воткинского водохранилищ при их наполнении и сработке // Комплексные экологические исследования водоемов и водотоков бассейна реки Камы / Перм. ун-т. Пермь, 1993. С 6-11.
5. *Знаменский В.А.* Гидравлические сопротивления и турбулентный обмен при взаимодействии транзитного потока с плановыми водоворотами в водоемах // Труды ГГИ. 1969. Вып.173. С.86-99.

6. *Знаменский В.А.* К вопросу о процессах внутреннего водообмена и турбулентности на озере Байкал // Труды ГГИ. 1973. Вып.203. С.71-79.
7. *Знаменский В.А.* Влияние гидрологических и гидродинамических факторов на изменение концентраций химических веществ в водохранилищах волжского каскада // Материалы Всесоюз. науч.конф. по проблеме комплексного использования и охраны водных ресурсов бассейна Волги. Пермь, 1975. Вып.2. С.58-62.
8. *Знаменский В.А.* Влияние гидролого-динамических факторов на изменение содержания химических веществ в водохранилище // Труды ГГИ. Л.: Гидрометеиздат, 1977. Вып.246. С.58-77.
9. *Китаев А.Б.* Обмен вод в искусственных водоемах. Пермь, 2005. 112 с.
10. *Китаев А.Б.* Важнейшие гидродинамические характеристики водохранилищ (на примере Камского каскада). Пермь, 2006. 260с.
11. *Сокольников В.М.* Течения в глубинных слоях и водообмен в Байкале // Труды Лимнол. ин-та Сиб. отд. АН СССР.1970. Вып.14(34). С.67-74.
12. *Толмазин Л.М., Шнайдман В.А.* Статистический анализ течений и параметров горизонтальной турбулентности в Каховском водохранилище // Метеорология и гидрология. 1972. № 4. С.55-60.
13. *Тушинский С.Г.* Исследование горизонтальной турбулентности вод Можайского водохранилища. М.: Изд-во МГУ,1977. 14 с.
14. *Тушинский С.Г.* Экспериментальное исследование горизонтальной турбулентной диффузии в водоемах для оценки переноса загрязняющих веществ // Экспериментальные исследования гидрологических процессов и явлений. М.: Наука, 1979. Ч.1. С.161-168.
15. *Фомичев И.Ф., Литвинов А.С.* Многолетние изменения составляющих водного баланса Рыбинского водохранилища и их влияние на водообмен и уровень // Водные ресурсы. М.: Наука,1980. № 4. С.108-119.
16. *Фомичев И.Ф.* Многолетние изменения элементов гидрологического режима Рыбинского водохранилища и расчет их в связи с территориальным перераспределением стока: автореф. дисс...канд. геогр. наук. Пермь, 1982. 14 с.
17. *Ширяк И.М.* Исследование переноса загрязняющих веществ в мелководных и слабопроточных водоемах ветровыми течениями: автореф. дисс...канд. техн. наук. Л.,1978. 20с.
18. *Эдельштейн К.К.* Водохранилища России: экологические проблемы, пути их решения. М.: ГЕОС, 1998. 277 с.

## SUMMARY

On the basis of the analysis of long-term data on internal water exchange within the limits of morfometric sites of Kama and Votkinsk water basins it is established, that change of an exchange of waters depends from magnitude of year runoff; internal-year a course of water exchange on Votkinsk water basin depends on operating mode of Kama and Votkinsk hydroelectric power station; amplitude of fluctuations of an exchange of waters on Votkinsk the water basin is essential less, than on Kama water basins, that is connected with cascade position.