

Особенности турбулентного обмена вод в различных частях Камского водохранилища (многолетний аспект)

А.Б. Китаев

Пермский государственный университет

Настоящая работа является продолжением ранее выполненных исследований по водохранилищам Камского каскада в характерные по водности годы [2, 5] и по Воткинскому водохранилищу в многолетнем аспекте [7]. Как и в предыдущих работах, за основу оценки турбулентного обмена вод в различных частях Камского водохранилища в многолетнем аспекте взят широко используемый на водоемах России и стран ближнего зарубежья метод В.А.Знаменского [3]. Данный метод прошел адаптацию для условий Воткинского водохранилища и дал вполне удовлетворительные результаты.

В качестве расчетных створов приняты восемь пунктов на Камском водохранилище. Выбор этих пунктов обусловлен районированием водоема. В работе расчет коэффициентов турбулентного водообмена проведен за многолетний период с 1959 по 1983 г.

Расчет коэффициентов продольного A_x , поперечного A_y и вертикального A_z турбулентного водообмена выполнен следующим образом:

1. Среднемесячные уровни воды вычислены по наблюдаемым данным, опубликованным в «Гидрологическом ежегоднике» за рассматриваемый год. Для пунктов, по которым отсутствуют сведения об уровнях воды, выбраны репрезентативные пункты, ход уровня воды в которых отражает уровненный режим в расчетных створах (таблица).

Выбор репрезентативных пунктов наблюдений

Расчетные створы	Репрезентативный пункт наблюдений за уровнем воды	Репрезентативный водомерный пункт
Тюлькино	Тюлькино	-
Березники	Березники	-
Усть-Пожва	Усть-Пожва	Усть-Пожва
Висим	Висим	Висим
Слудка	-	Усть-Кемоль
Добрянка	Добрянка	Добрянка
КамГЭС	КамГЭС	-

2. Площадь водного сечения и ширина водоема определялись по графикам связи $V=f(H)$ и $w=f(H)$ для каждого поста наблюдений. По уравнениям, которые соответствуют прямым, ширина или площадь определялась с помощью программы Excel. Средняя глубина водоема в

расчетном створе определялась, как отношение площади поперечного сечения к ширине водоема.

3. Т.П. Девятковой [1] предложена методика определения среднемесячных расходов воды, в основе которой лежит уравнение неразрывности. По этой методике были определены расходы воды по длине Камского и Воткинского водохранилищ за 1959-1987 гг. [5,6]. Средняя скорость течения в расчетных створах вычислена как отношение расхода воды через поперечное сечение к его площади.

4. Числа Рейнольдса и Фруда вычислены по формулам гидравлики [4].

5. Некоторые затруднения вызвало определение уклонов водной поверхности, поскольку их значения для большей части рассматриваемого водохранилища равны нулю. Для верхних участков водохранилища (Тюлькино - Березники - Усть-Пожва) уклон вычислен по разности между соответствующими значениями среднемесячных уровней воды в этих пунктах. Для других створов средний за расчетный период уклон принят равным среднегодовому уклону водной поверхности между водомерными пунктами Усть-Пожва и КамГЭС. Однако в некоторых случаях на участке Усть-Пожва – КамГЭС наблюдается разница в уровнях, что приводит к появлению уклона водной поверхности, который необходимо учитывать, так как он играть большую роль в вычислении коэффициента турбулентности.

Формулы, по которым вычислены коэффициенты турбулентного водообмена, использовались в следующем виде:

$$A_z = 2.82v \cdot (Re/Fr) \cdot (I^{1.5}/Fr^{0.5}), \quad (1)$$

$$A_y = 2.82v \cdot ((B/H) \cdot (Re/Fr) \cdot (I^{1.5}/Fr^{0.5})), \quad (2)$$

$$A_x = k_1 v \cdot (Re/Fr)^{0.5} \cdot (IRe)^{0.5}, \quad (3)$$

где A_z – коэффициент турбулентного обмена по глубине; A_y – коэффициент турбулентного обмена в поперечном направлении к потоку; A_x – коэффициент турбулентного обмена вдоль оси потока, H – средняя глубина, B – ширина, Re – число Рейнольдса, Fr – число Фруда, I – уклон водной поверхности.

Изменение турбулентного перемешивания водных масс по длине водохранилища

По характеру пространственного распределения турбулентной активности для Камского водохранилища можно четко выделить три района:

- 1) район от выклинивания подпора до озеровидного расширения (расчетные створы Тюлькино-Усть-Пожва);
- 2) район центральной части водоема (Усть-Пожва – Слудка);
- 3) район нижней части водоема (от Слудки до плотины КамГЭС).

Турбулентное перемешивание водных масс целесообразно характеризовать отдельно по каждому из районов, тем более, что указанное деление совпадает с морфометрическим районированием водохранилища.

Для **первого района** характерно уменьшение значений коэффициентов в вертикальном, поперечном и продольном направлениях от Тюлькино до Усть-Пожвы. Это можно объяснить таким же распределением уклона водной поверхности. На этом участке во время весеннего наполнения водоема характерно повышение всех коэффициентов, т. е. увеличение турбулентной активности. Это связано с повышением уровня воды в весенние месяцы и с большими уклонами водной поверхности в этом районе.

Турбулентная активность потока наблюдалась во всех направлениях. Ее значения велики в вертикальном и продольном направлениях по сравнению с остальными двумя районами. А также они максимальны для рассматриваемого участка водохранилища в это время года. Таким образом, коэффициент турбулентного водообмена в вертикальном направлении колебался от 0,80 до 110 г/см · с в течение многолетнего периода. Минимальное его значение наблюдалось в 1967 г., а максимальное – в 1972 г. Многоводный 1979 г. не отличился наибольшим значением вертикального коэффициента ($A_z=62,2$ г/см · с) по сравнению с 1972 г. Это связано с тем, что отношение числа Рейнольдса к числу Фруда Re/Fr , используемое при вычислении вертикального коэффициента A_z , в этом году меньше, чем в 1972 г.

На протяжении всего многолетнего периода турбулентная активность в вертикальном направлении изменялась значительно. С 1960 по 1965 г. вертикальная турбулентность уменьшалась, в 1966 году возросла, затем снова снизилась. В 1972 г. наблюдался пик вертикальной турбулентной активности. С 1973 по 1978 г. наблюдалось ее уменьшение, в 1979 г. вновь повышение, затем снова отмечалось снижение вертикального турбулентного водообмена.

Вертикальная турбулентная активность была максимальна на этом участке весной в течение многолетнего периода. На это повлияли значительный уклон водной поверхности, ветер и взаимодействие потока с береговой линией и с донным рельефом, приводящее к образованию водоворота. 1980 г. стал исключением, так как значение вертикального коэффициента не было наибольшим весной. Максимум наблюдался зимой, в феврале. Причина этого – высокое значение отношения Re/Fr в феврале, большее, чем в весенние месяцы этого года.

В поперечном направлении турбулентная активность невелика по сравнению со вторым районом вследствие того, что этот участок имеет узкие очертания. Но весной в районе выклинивания подпора поперечный коэффициент максимален (исключение – 1980 г.). Наибольшего значения он достиг в марте 1972 г. по той же причине, что и вертикальная турбулентность, и составил $30,9 \cdot 10^3$ г/см · с. Минимальная турбулентная активность в поперечном направлении наблюдалась в мае 1962 г. Поперечный коэффициент A_y составил $0,27 \cdot 10^3$ г/см · с. В течение многолетнего периода поперечная турбулентная активность варьировала незначительно. С 1960 г. значения поперечного коэффициента уменьшались до 1970 г. Затем повысились в 1972 г. когда и наблюдался пик. Далее было снижение турбулентной активности.

Последующее возрастание было отмечено в 1979 г. В дальнейшем происходило понижение турбулентной активности в поперечном направлении.

Продольная турбулентная активность в районе выклинивания подпора наиболее стабильна в течение многолетнего периода. Значительных колебаний продольного коэффициента не наблюдалось. Он изменялся от 6,70 (1977 г.) до 15,4 г/см · с (1979 г.). Продольная турбулентная активность в этом районе максимальна весной, так как для продольного коэффициента характерно поступательное движение воды, значительный уклон водной поверхности, градиент силы тяжести и значительное развитие проточных течений. Все это характерно для первого района.

В летне-осенний период происходит стабилизация уровненного режима, характеристики потока выравниваются, значения коэффициентов уменьшаются. Турбулентная активность наблюдается в основном в продольном направлении.

Продольный коэффициент турбулентного водообмена в течение многолетнего периода изменялся летом от 0,00 до 9,43 г/см · с, а осенью – достигал 8,46 г/см · с. Минимальные его значения были отмечены с 1960 по 1963 г., а также в 1964, 1966, 1968, 1970, 1972 гг., с 1975 по 1976 г. и в 1983 г. Это связано с малыми уклонами водной поверхности. Максимумы пришлись на 1965 и 1974 гг., причина – высокие уровни и значительные уклоны водной поверхности.

В зимний период турбулентность водных масс возрастает в связи со сработкой водохранилища, с увеличением уклона водной поверхности и перехода части потока в речные условия. Турбулентный водообмен активен во всех направлениях. Максимальные значения всех составляющих турбулентного водообмена наблюдались в феврале 1972 г. ($A_z=72,7$ г/см · с, $A_y=20,9 \cdot 10^3$ г/см · с, $A_x=9,44$ г/см · с). Продольный и вертикальный коэффициенты были наибольшими на этом участке по сравнению с другими районами. В декабре 1961 г. значения всех составляющих турбулентного водообмена были минимальны ($A_z=0,21$ г/см · с, $A_y=0,06 \cdot 10^3$ г/см · с, $A_x=1,65$ г/см · с). Причина – наименьшее значение отношения Re/Fr в 1961 г. по сравнению с другими годами.

Второй район отличается своеобразием гидродинамических процессов по сравнению с двумя другими. Для него характерно резкое возрастание турбулентного обмена во всех направлениях, особенно в поперечном к оси потока направлении. Причину, по-видимому, следует искать в системе факторов воздействующих на турбулентный обмен. При выходе в этот район водный поток, обладающий сравнительно большими для водохранилища скоростями течения, значительной кинетической энергией, испытывает резкое расширение от 1-3 км до 35 км в районе впадения рек Иньвы и Косьвы. Это обуславливает возникновение активных циркуляционных зон и столкновение со значительными более инертными водными массами, особенно в поперечном и вертикальном направлении. Также нельзя не учитывать такого важного фактора, как поступление воды, из значительных по своим размерам рек

Иньвы, Косьвы, Обвы, которые также оказывают влияние на турбулентную активность в поперечном направлении.

В течение многолетнего периода весной наблюдалось значительное повышение турбулентной активности в поперечном направлении по сравнению с другими районами. Это объясняется различием морфометрических характеристик в первом и во втором районах. Максимальное значение поперечного коэффициента турбулентного водообмена наблюдалось в 1961 г. ($A_y = 256 \cdot 10^3$ г/см · с).

В весенний период вертикальный и продольные коэффициенты в центральном озеровидном районе ниже, чем в районе выклинивания подпора, вследствие незначительных уклонов водной поверхности. Хотя весной 1961 г. во втором районе было отмечено самое высокое значение вертикального коэффициента ($A_z = 150$ г/см · с) по всему водоему. Причина – максимальное значение отношения Re/Gr .

Летне-осенний период отличается стабилизацией уровней. Стабильность наблюдается в продольном направлении. Продольная турбулентная активность в течение многолетнего периода варьирует незначительно, в среднем от 2 до 6 г/см · с. Вертикальный и поперечный турбулентный водообмен в летне-осенний период увеличился. Свою роль сыграли высокий уровень воды и высокое значение отношения Re/Gr , в результате которого пик пришелся на август и ноябрь 1961 г. На величину поперечного турбулентного водообмена повлияло поступление воды крупных боковых притоков, что привело к столкновению инертных водных масс. Повышение вертикального турбулентного водообмена можно объяснить ветровым воздействием на водную поверхность, что характерно для центрального озеровидного района.

Период зимней сработки характеризуется наибольшей величиной турбулентной активности в вертикальном и поперечном направлении по сравнению с другими периодами года. Максимальными значениями коэффициентов турбулентного водообмена в вертикальном и поперечном направлениях характерны для января 1962 г. ($A_z = 580$ г/см · с, $A_y = 960 \cdot 10^3$ г/см · с).

Продольный турбулентный водообмен не активен в этом районе и изменяется в пределах от 2 до 5 г/см · с.

Третий - приплотинный район, находящийся в зоне постоянного подпора, характеризуется большими глубинами и незначительными уклонами водной поверхности. Следовательно, для этого района характерна турбулентная активность в вертикальном направлении. Особенно велика она в летне-осенний период 1963 г., в результате ветрового воздействия и стояния уровней вблизи НПГ, и в зимний период 1962 г.

Продольная составляющая турбулентного водообмена также присутствует в этом районе. Она стабильна во все сезоны в течение многолетнего периода и составляет в среднем 5,5 г/см · с.

Выводы

Таким образом, изменение коэффициентов турбулентного водообмена по длине Камского водохранилища разнообразно в течение многолетнего периода. Для первого района характерна турбулентная активность в вертикальном и продольном направлениях, особенно весной. Для второго района – во всех направлениях, особенно в поперечном. Наиболее активна турбулентность в летне-осенний и зимний периоды. А для третьего района – в вертикальном и продольном направлениях, особенно в летне-осенний и зимний периоды. Это объясняется различием в морфометрических характеристиках и в разнице уклонов водной поверхности для этих районов. По длине Камского водохранилища выделяется следующая закономерность – увеличение турбулентного водообмена от верхнего района к центральному и снижение в нижнем районе.

Внутригодовое распределение внутреннего водообмена, определяемое турбулентным перемешиванием

Один из основных факторов, определяющих внутренний водообмен в Камском водохранилище, является водный баланс водоема, а точнее, соотношение его приходных и расходных частей. С этим связан характер изменения водных масс в течение года, а также различия в интенсивности турбулентного водообмена в годы различной водности.

Известно, что физической основой движения водных масс является наличие градиента силы тяжести, возникающего при различных внешних воздействиях. Величина этого градиента от года к году и в течение года, следовательно, и интенсивность водообмена, им обусловленного, тоже меняется. Поэтому наиболее интенсивно водообмен в продольном и вертикальном направлениях происходит в верхних частях водохранилища вследствие сравнительно больших уклонов водной поверхности. В центральной и в нижней частях водоема интенсивность водообмена меняется в зависимости от других факторов (особенности морфометрии и морфологии, в летний период - от степени развития ветрового волнения). Наличие крупных притоков в центральной части Камского водохранилища создает благоприятное условие для столкновения различных водных масс и для увеличения степени их перемешивания.

Первый район – район переменного подпора от Тюлькино до Усть-Пожвы. Для него характерно турбулентное перемешивание в продольном и вертикальном направлениях. На в/п Тюлькино в течение многолетнего периода наибольшие значения вертикального и продольного коэффициента наблюдались в весенний период. Они были равны $A_z=110$ г/см · с (1972 г.) и $A_x=15,4$ г/см · с (1979 г.). Причина этого – увеличение уклонов водной поверхности, увеличение проточности, повышение величины скоростей течения, а следовательно, и кинетической энергии потока. Вследствие этого возникают циркуляционные условия при движении потока по водоему с довольно сложной морфометрией (чередование сужений и расширений).

Для Тюлькино характерен один пик в весенний период для всех составляющих турбулентного водообмена в отличие от других водомерных постов в этом район. На в/п Березники и Усть-Пожва не наблюдается постоянства в распределении турбулентного водообмена, пики наблюдаются во все сезоны. Что очень сложно объяснить обычными особенностями всех составляющих турбулентного водообмена, которые характерны для этого района. Но для продольной составляющей турбулентного водообмена на в/п Березники всегда характерен пик в весенний период.

Летом в течение многолетнего периода на в/п Тюлькино наблюдалось снижение турбулентной активности водных масс по сравнению с периодом наполнения водоема. Причина - полное наполнение водохранилища, уменьшение скоростей течения, приобретение потоком более или менее установившегося характера движения. Значения вертикального коэффициента изменялись от 0,09 г/см · с (в 1967 г.) до 23 г/см · с (в 1980 г.). Продольный коэффициент изменялся от 2,04 г/см · с (в 1967 г.) до 9,43 г/см · с (в 1974 г.). К началу лета значения турбулентной активности высоки, а к концу этого периода происходит их снижение.

В осенний период турбулентный водообмен незначительно увеличивается, в связи с постепенной сработкой водохранилища, с увеличением скоростей течения, с увеличением кинетичности и турбулентности потока. Турбулентная активность в вертикальном направлении достигает 17,4 г/см · с, а в продольном – 8,46 г/см · с.

В зимний период в результате полной сработки водоема значение коэффициента турбулентного водообмена в вертикальном направлении значительно возрастает – до 72,7 г/см · с. Продольный коэффициент имеет значение 9,44 г/см · с.

Соответственно, в течение многолетнего периода для первого района было характерно увеличение турбулентной активности в период весеннего наполнения, снижение ее летом, незначительное повышение осенью и повышение ее во время зимней сработки водоема.

Второй район – центральная часть водохранилища от Усть-Пожвы до Слудки. Для этого района характерно увеличение турбулентной активности во всех направлениях, особенно в поперечном. Причины этого заключаются в морфометрии второго района и в столкновении водных масс. Поступившие из верхней части водохранилища водные массы с большой кинетической энергией сталкиваются с водной толщей рассматриваемого района, обладающего большими запасами поступательной энергии. Вследствие этого возникают инертные турбулентные движения в поперечном и вертикальном направлениях, т. е. там, где сопротивление движению меньше.

Величину турбулентного водообмена можно анализировать по в/п Висим, так как на этом посту турбулентная активность наиболее ярко выражена.

В течение многолетнего периода во втором районе максимальное значение турбулентной активности наблюдалось зимой. Вертикальный коэффициент турбулентной активности составлял 580 г/см · с, а поперечный –

$960 \cdot 10^3$ г/см*с. Это объясняется возникновением инертного турбулентного движения в поперечном и вертикальном направлениях.

От зимы к весне наблюдается значительное уменьшение турбулентной активности на протяжении всего многолетнего периода. Весной вертикальный турбулентный водообмен равен 150 г/см · с, а поперечный – $256 \cdot 10^3$ г/см · с. Это связано с уменьшением уровней воды и со значительной величиной отношения гидродинамических характеристик в зимний период.

От весеннего периода к летнему характерно увеличение коэффициентов турбулентного водообмена. Вертикальный коэффициент увеличивается до 457 г/см · с, а поперечный – до $773 \cdot 10^3$ г/см · с. Увеличение вертикальной турбулентной активности летом связано с возникновением ветровой деятельности на акватории водохранилища, что особенно характерно для центрального озеровидного участка водоема. Повышение поперечного коэффициента турбулентного водообмена можно объяснить стоянием уровней воды вблизи НПП и столкновением инертных водных масс в водоеме.

В осенний период коэффициенты достигают следующих значений: $A_z=344$ г/см*с, $A_y=579 \cdot 10^3$ г/см · с, то есть турбулентная активность осенью немного снижается. В дальнейшем наблюдается заметное увеличение зимой.

Продольная составляющая турбулентного водообмена на протяжении всего многолетнего периода была стабильна. Значительных колебаний отмечено не было. Это связано с наличием в этом районе так называемой Висимской депрессии и с незначительными уклонами водной поверхности. В среднем продольный коэффициент составил 4 г/см · с. Наименьшее значение продольного коэффициента наблюдалось также весной. А в остальные периоды было увеличение турбулентной активности в продольном направлении, но ярко выраженных пиков отмечено не было.

Таким образом, второй район отличается интенсивностью турбулентного водообмена во всех направлениях, особенно в поперечном. Для центрального озеровидного участка характерно три пика в летне-осенний и зимний периоды. Наибольшего значения коэффициенты турбулентной активности достигают зимой, а наименьшего – весной.

Третий район – приплотинный участок водохранилища от Слудки до Камской ГЭС. Этот участок отличается наименьшими значениями всех составляющих турбулентного водообмена в течение многолетнего периода по сравнению с другими двумя районами. Для этого района характерны вертикальный и продольный турбулентный водообмен. Вследствие поступательного движения воды, развития проточных течений и активной ветровой деятельности на акватории водоема.

На протяжении всего многолетнего периода весной турбулентная активность была минимальной ($A_z=0,29$ г/см · с, $A^x=1,98$ г/см · с). Заметное увеличение наблюдалось в летне-осенний период в результате возникновения ветровой деятельности ($A_z=104-107$ г/см · с, $A_x=8,93-9,08$ г/см · с).

Максимальное значение турбулентной активности в вертикальном направлении наблюдалось зимой в течение всего многолетнего периода.

Вертикальный коэффициент турбулентной активности был равен $111 \text{ г/см} \cdot \text{с}$, а продольный – $8,17 \text{ г/см} \cdot \text{с}$. Продольный коэффициент турбулентного водообмена в течение летне-осеннего и зимнего периодов варьировал незначительно в отличие от вертикальной составляющей, в среднем он составлял $8,5 \text{ г/см} \cdot \text{с}$.

Соответственно, внутригодовой ход турбулентного водообмена третьего района был похож на внутригодовое распределение турбулентной активности второго района.

Выводы

Таким образом, внутригодовой ход турбулентного водообмена Камского водохранилища своеобразен и различен для трех районов. Для первого района характерно повышение турбулентной активности в весенний период, снижение ее летом, незначительное повышение осенью, и далее возрастание ее в зимний период. Второй район отличается тремя пиками в летне-осенний период и в зимний. Наибольшего значения коэффициенты турбулентного водообмена достигают зимой, а наименьшего – весной. В третьем районе турбулентный водообмен незначителен весной, увеличивается летом и осенью и максимально возрастает зимой. Причинами всего этого являются морфометрические и морфологические характеристики участков водоема, климатические и другие процессы, оказывающие влияние на внутренний водообмен.

Характеристика составляющих турбулентного водообмена в различных направлениях (общие выводы по работе)

В зависимости от влияния тех или иных факторов турбулентный водообмен в различных направлениях осуществляется неодинаковым образом.

Продольный водообмен осуществляется при поступательном движении воды, при наличии уклона водной поверхности и наличии градиента силы тяжести. Как правило, турбулентная активность в продольном направлении наблюдается при значительном развитии проточных течений. Чем более развиты такие течения, тем интенсивней водообмен в направлении их движения. Продольное направление характерно для первого района особенно в весенний период. В приплотинном районе турбулентный водообмен в продольном направлении активен в летне-осенний и зимний периоды. В центральном районе Камского водохранилища продольный водообмен весьма незначителен. Он осуществляется благодаря поступательному движению водных масс в этот район из притоков и верхней части водохранилища.

Поперечный водообмен обусловлен в первую очередь морфометрией водоема и поэтому более развит на Камском водохранилище по сравнению с Воткинским. Поперечный водообмен особенно развит в озеровидном участке Камского водохранилища. Поперечная составляющая наиболее активна в летне-осенний и зимний периоды.

Вертикальный водообмен наблюдался во всех трех районах особенно там, где активно развивается ветровая деятельность на акватории водохранилища.

Ветер может оказывать благоприятные условия для осуществления вертикальной циркуляции. Кроме того, вертикальная турбулентность обусловлена взаимодействием потока с береговой линией и с донным рельефом, что приводит к образованию водоворотов. Коэффициент вертикального турбулентного водообмена можно наблюдать в районе выклинивания подпора и в приплотинном районе водохранилища. В первом районе активность продольной составляющей отмечена в весенний период, а в третьем – в летне-осенний и зимний периоды. В течение многолетнего периода вертикальный коэффициент значительно изменялся.

Таким образом, составляющие турбулентного водообмена в вертикальном, продольном и поперечном направлениях имеют различные причины возникновения. В соответствие с этим можно выделить две группы факторов, которые оказывают влияние на турбулентность в том или ином направлении. К первой группе можно отнести прямые факторы, а ко второй – косвенные. Прямые факторы: морфометрия и морфология водохранилища, уклон водной поверхности, водный баланс, проточные течения, ветрено-волновой режим и др. Косвенным фактором возникновения турбулентности в том или ином направлении является климат.

Водность лет играет важную роль в формировании турбулентности в трех различных направлениях. Многоводный 1979 г. повлиял на продольную составляющую турбулентной активности в первом районе, а маловодный 1967 год – на вертикальный и поперечный турбулентный обмен во втором и третьем районах.

Библиографический список

1. *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; Перм. ун-т. Пермь, 1979. С. 129-134.

2. *Девяткова Т.П.* Методы расчета внутреннего водообмена в Камских водохранилищах и его особенности / Т.П. Девяткова, А.Б.Китаев, И.К.Мацкевич и др. // Комплексные исследования гидрологии и водной экологии Камских водохранилищ и рек их водосборов; Перм. ун-т. Пермь, 1987. С.15-21.

3. *Знаменский В.А.* Гидрологические процессы и их роль в формировании качества воды / В.А. Знаменский. Л., Гидрометиздат, 1981.

4. *Караушев А.В.* Внешний водообмен и формирование качества воды в озерах и водохранилищах / А.В.Караушев // Тр. ГГИ. Л.: Гидрометеиздат, 1978. Вып. 249. С. 48-62.

5. *Китаев А.Б.* Обмен вод в искусственных водоемах (на примере водохранилищ Камского каскада): учеб. пособие / А.Б.Китаев; Перм. ун-т. Пермь, 2005. 112 с.

6. *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. 22 с.

7. *Китаев А.Б.* **Турбулентный обмен вод в Воткинском водохранилище (многолетний аспект)** / А.Б. Китаев // *Геогр. вестник. Пермь, 2007. № 1-2. С.96-106.*