

УДК 556.551.7

ПЛОТНОСТНЫЕ ЭФФЕКТЫ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ НЕОДНОРОДНОСТЬЮ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МИНЕРАЛИЗАЦИИ ВОДЫ РАЗЛИЧНОГО ГЕНЕЗИСА В РАВНИННЫХ ВОДОХРАНИЛИЩАХ

© 2024 г. А. П. Лепихин^{а,*}, Т. П. Любимова^б, А. В. Богомолов^а, Ю. С. Ляхин^а, Я. Н. Паршакова^б

^аГорный институт УрО РАН, ул. Сибирская, 78а, г. Пермь, 614007, Россия

^бИнститут механики сплошных сред УрО РАН, ул. Академика Королева, 1, г. Пермь, 614000, Россия

*e-mail: lepin49@mail.ru

Поступила в редакцию 15.03.2023 г.

После доработки 07.05.2024 г.

Принята к публикации 29.05.2024 г.

Рассмотрены особенности формирования вертикальной стратификации водных масс в водохранилищах, обусловленных неоднородностью распределения минерализации воды. Данные эффекты с различным генезисом рассмотрены на трех примерах. В качестве первого примера рассмотрено Камское водохранилище в зоне слияния рек Сылвы и Чусовой, характеризующееся в зимний период различным гидрохимическим режимом. В зоне их слияния в зимний период формируется вертикальная стратификация водных масс, которая способна оказывать существенное влияние на минеральный состав водных масс, используемых для водоснабжения г. Перми. Показано, что внутрисезонная неравномерность работы Камской ГЭС влияет на колебания границы раздела водных масс. В то же время положение самой границы раздела водных масс весьма устойчиво относительно сезонной сработки водохранилища. В качестве второго примера рассмотрено небольшое водохранилище в зоне активного техногенеза, характеризующееся фильтрационными разгрузками высокоминерализованных подземных вод. Если наблюдаемая стратификация водных масс в данных примерах достаточно стабильна в течении целого сезона, то в третьем рассмотренном примере — Камском водохранилище в районе г. Березники, расположенном в зоне выклинивания подпора, она весьма непродолжительна, может наблюдаться только в течение нескольких дней. Несмотря на свою относительную непродолжительность, она очень существенна для обеспечения устойчивого водоснабжения. Обсуждаются факторы, определяющие продолжительную вертикальную неоднородность водных масс в исследуемых объектах.

Ключевые слова: водохранилище, стратификация, минерализация, устойчивость водоснабжения

DOI: 10.31857/S0002351524040094 EDN: JGXDAG

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существенный практический интерес к слоистым структурам связан с решением задач организации устойчивого водоснабжения из поверхностных водных объектов. Одно из первых описаний наличия устойчивой вертикальной неоднородности водных масс в равнинных водохранилищах и связанных с ними течений дано в работах [Эдельштейн, 1991; Кременецкий и др. 1997; Пуклаков, 1999; Абакумов и др., 2000; Самохвалов, 2007]. Выполненные в последующем исследования [Богомолов и др. 2021] показали, что наблюдаемые в водохранилищах слоистые структуры могут характеризоваться различающимися временными масштабами от многолетних с относительно небольшими сезонными колебаниями до наблюдаемых в течение нескольких суток.

В то же время водохранилища играют важную роль в борьбе с наводнениями, устойчивости систем водоснабжения и производстве электроэнергии, они принципиально изменяют гидрологический и гидродинамический режимы рек вследствие увеличения глубины воды, времени пребывания и замедления потока воды [Li et al., 2020; Morovati., et al., 2022]. Увеличение глубины при значительном снижении скорости течения создает условия для формирования вертикальной плотностной стратификации водных масс. Это вертикальное разделение водной толщи влияет на всю водную экологию водоема, включая растворенный кислород, питательные вещества и доступность микробного субстрата [Becker et al., 2010), Chen et al., 2009; Cantin et al., 2011].

Исследованию этих вопросов посвящено большое количество публикаций [Zhang et al., 2014;

Liu et al., 2020]. В субтропических или тропических мономиктических озерах и водохранилищах стратификация водной толщи в зависимости от сезонного цикла является результатом турбулентных процессов перемешивания, в первую очередь, вызванных ветровым воздействием [Noori et al., 2019] и теплообменом в системе «воздух — вода» [Saber и др., 2018]. Наличие стратификации в летний и весенний периоды, связанное с поверхностным поступлением тепла, как правило, перевешивает вертикальное перемешивание, формируя устойчивое плотностное расслоение водных масс. В холодный период начинают доминировать процессы вертикального перемешивания. Гидродинамические процессы в водохранилищах, в том числе и процессы формирования стратификации различаются в зависимости от типа водохранилища. Водоохранилища руслового типа сохраняют форму русла реки, т.е. глубина и ширина водотока значительно меньше длины. Учитывая большой приток в таких водоемах, гидродинамические процессы протекают сложнее, чем в озерах. При этом в настоящее время большинство исследований направлено на установление зависимостей между характеристиками притока (например, расходом, температурой) и характеристиками стратификации, такими как продолжительность существования и величина градиента плотности [Becker et al., 2010; Zhang et al., 2014], которые недостаточны для оценки составляющих термического режима и режима течений водохранилища. Разность плотностей воды притока и водной массы водохранилища приводит к возникновению плотностных течений [Chung et al., 2009; Franca, 2017; Munoz et al., 2020], вызванных температурой воды и разницей в концентрации веществ.

В последние годы были выполнены исследования для озера Уиндермир в Великобритании [Woolway et al., 2017; Simpson et al., 2021] и для водохранилища «Три ущелья» [Yang et al., 2015; Gao et al., 2018]. В этих исследованиях режим течения обусловлен неоднородным пространственным распределением температуры воды [Coates et al., 1993; Webster, 2006; Li et al., 2020]. Однако в больших водохранилищах руслового типа характер течений и термической структуры влияет на сочетание баротропных и бароклинных эффектов [Xie et al., 2017]. Поэтому результаты, полученные на озерах или водохранилищах озерного типа, не

могут быть непосредственно перенесены на большие водохранилища руслового типа.

Необходимо подчеркнуть, что в большинстве рассматриваемых работ стратификация водных масс обуславливалась вертикальной неоднородностью распределения температуры воды или мутности воды. В то же время при решении прикладных задач, связанных с хозяйственным использованием водохранилищ для целей питьевого или технического водоснабжения, наибольший интерес представляют задачи, где стратификация обуславливается неоднородностью распределения минерализации воды. При проведении масштабных экспедиционных наблюдений вместо показателя минерализации воды, как правило, весьма удобно использовать показатель удельной электропроводности воды, имеющий при стабильном химическом составе очень тесную связь с минерализацией воды. Содержание взвешенных наносов удобно оценивать через мутность воды.

Характерной особенностью водохранилищ является то, что впадающие в них реки могут характеризоваться повышенным содержанием взвешенных наносов, поэтому при оценке плотности воды рекомендуется учитывать содержание в ней наносов. В общем случае плотность воды определяется совокупностью следующих трех определяющих факторов: минерализацией воды, температурой и содержанием взвешенных наносов. Так как глубины водохранилищ, тем более равнинных, не превышают, как правило, 100 м, то изменение давления на колебания плотности воды не учитывается. В озерах учет влияния давления на плотность воды был предпринят в работе [Квон и др., 1999]. В работе [Morovati et al., 2022] для этих целей используется следующее соотношение:

$$\rho(S) = \rho + \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right) \cdot S, \quad (1)$$

где $\rho(S)$ — зависимость плотности воды от содержания в ней взвешенных наносов, ρ_s — плотность материала взвешенных наносов, S — концентрация взвешенных наносов.

В качестве критерия устойчивости в водных объектах, как правило, используется число Ричардсона [Самохвалов, 2007]

$$Ri = \left(\frac{g}{\rho}\right) \frac{\left(\frac{\partial \rho}{\partial z}\right)}{\left(\frac{\partial V}{\partial z}\right)^2}, \quad (2)$$

где ρ — плотность воды, кг/м^3 , g — скорость свободного падения, м/сек^2 , z — вертикальная координата по глубине потока, V — характерная скорость потока.

При анализе двухслойных структур, наряду с числом Ричардсона, при решении прикладных задач используется плотностное число Фруда [Самохвалов, 2007]:

$$Fr = \frac{V^2}{\frac{\Delta\rho}{\rho} \cdot g \cdot h}, \quad (3)$$

где $\frac{\Delta\rho}{\rho}$ — относительное различие плотности рассматриваемых водных масс. В качестве критического значения для формирования вертикальной неоднородности водных масс, как правило, принимается $Fr_{кр} < 1$.

Ситуация, когда стратификация водных масс обуславливается неоднородностью распределения минерализации, накладывает определенный специфический отпечаток на характер и решение этих задач. К сожалению, таких работ значительно меньше, поэтому нам представляется целесообразным обсудить вопросы учета стратификации водных масс, связанных с решением конкретных задач организации устойчивого водоснабжения. Характерной особенностью работы ГЭС является их технологическая возможность оперативного и быстрого изменения выработки электроэнергии. Данным качеством они принципиально отличаются от тепловых и атомных станций, которым требуется стабильный режим работы. Так как население крупных городов в течение суток очень неравномерно потребляет электроэнергию: ночью минимальное потребление, а утром, днем — максимальное, то для покрытия пиковой нагрузки очень удобно использовать ГЭС. Неравномерность выработки на них электроэнергии определяется неравномерностью сброса воды из верхнего бьефа ГЭС в нижний. Соответственно, достаточно резкие изменения расходов сбросов воды через плотину гидроузлов ГЭС отражаются на гидродинамическом режиме не только нижних, но и верхних бьефов. В настоящей работе рассматриваются три конкретных примера, характеризующихся различным генезисом формирования вертикальной стратификации водных масс: Камское водохранилище в районе впадения рек Сылвы и Чусовой; Верхне-Зырянское водо-

хранилище; р. Кама (Камское водохранилище) в районе г. Березники.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве первого примера формирования устойчивой зоны вертикальной неоднородности водных масс, связанной с неоднородностью распределения минерализации воды, следует рассмотреть находящуюся в подпоре от Камской ГЭС область слияния рек Чусовой и Сылвы. Для г. Перми гидродинамика верхнего бьефа Камской ГЭС имеет особое значение, так как там располагается основной питьевой водозабор г. Перми — Чусовские очистные сооружения (ЧОС). В тоже время при стабильной работе гидроузлов или их расположении на значительном расстоянии также могут формироваться зоны вертикальной неоднородности водных масс, влияющих на их хозяйственное использование.

В качестве второго примера рассматривается Верхне-Зырянское водохранилище в зоне активного техногенеза. Существенно другой характер формирования вертикальной стратификации водных масс наблюдается на данном водохранилище, специально созданном для обеспечения технического водоснабжения крупных промышленных предприятий г. Березники.

Верхне-Зырянское водохранилище находится в долине реки Зырянка. Река Зырянка — левобережный приток реки Камы, впадает в 889 км от ее устья. Река Зырянка образуется слиянием рек Извер и Легчим. Река Зырянка относится к водным объектам с очень малой гидрологической изученностью, практически полным отсутствием информации на гидрологических постах государственной сети наблюдений.

Данное водохранилище, построенное и введенное в постоянную эксплуатацию в 1969 году, расположено в 3.5 км юго-восточнее города Березники. Отметка нормального подпорного уровня воды водохранилища составляет 124.0 м БС. Уровень воды в верхнем бьефе Верхне-Зырянского водохранилища стабилен и в среднем держится на отметке 123.4 м.

В качестве третьего примера рассматривается верхний участок Камского водохранилища, находящийся в зоне переменного подпора, в районе г. Березники. В летний период при поддержании уровня воды в водохранилище близком к НПУ — 108.5 м БС в его русловой части глубина достигает

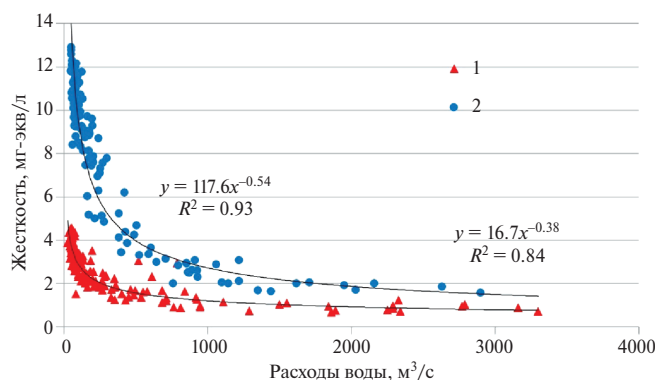


Рис. 1. Зависимость общей жесткости воды рек Чусовой (1) и Сылвы (2) от их расходов воды.

15–20 м и наблюдается небольшая скорость течения ~ 0.1 м/с. В то же время в зимний период наблюдается значительная сработка водохранилища на 6–7 м и отмечаются типичные речные условия. Рассматриваемый участок р. Кама (Камское водохранилище) активно используется для решения задач технического водоснабжения крупных предприятий Соликамско-Березниковского промышленного узла. Необходимо подчеркнуть, что данный район является центром разработки одного из крупнейших в мире месторождений калийных и магниевых руд. Характерной особенностью данного района является то, что вследствие достаточно сложного комплекса природных и техногенных факторов на данном участке Камского водохранилища, происходит фильтрационная разгрузка высокоминерализованных рассолов [Лепихин и др., 2020; 2022].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Слияние двух находящихся в подпоре рек Чусовой и Сылвы, характеризующихся существенно различающимся гидрохимическим режимом. Для г. Пермь эта область имеет принципиальное значение, лимитирующим показателем качества воды, используемой для водоснабжения, является ее жесткость. При этом жесткость воды имеет очень тесную корреляционную связь как с минерализацией воды, так и величиной удельной электропроводности — $R^2 > 0.92$. В то же время, если годовой объем стока рек Чусовой и Сылвы довольно близок между собой, то их гидрохимический режим, исходя из особенностей почвенно-геохимического строения их водосборных территорий, значительно различается. Особенно заметно это различие в содержании минеральных солей, определяющих жесткость воды, в первую очередь, в содержании ионов кальция, магния, гидрокар-

бонатов. Показатель жесткости воды в р. Сылве в зимний период достигает 13 мг-экв/л (рис. 1).

С целью изучения механизмов и природы этих колебаний были проведены суточные измерения в 2021 г. с использованием универсального измерительного комплекса MIDAS ECM фирмы Valeport. Прибор был установлен на границе раздела водных масс на отметке 97.5 м БС. Изменялись и анализировались не только колебания удельной электропроводности, температуры, но скорости и направления течения.

Проводимые в течение целого ряда лет исследования показали, что в данной области в течение зимнего периода наблюдается устойчивая вертикальная стратификация водных масс, характерные распределения удельной электропроводности воды исследуемого района в зимний период представлены на рис. 2.

Верхне-Зырянское водохранилище в зоне активного техногенеза. При проектировании этого гидротехнического сооружения не была учтена возможность фильтрационных разгрузок в него высокоминерализованных вод, конструктивно не предусмотрена организация его эффективной промывки при прохождении весеннего половодья. Кроме того, в связи с техническим переоснащением предприятий, переходом на новое оборудование, значительно возросли требования к качеству забираемой воды. Предельно допустимая концентрация (ПДК) хлоридов, рассматриваемых как основной лимитирующий показатель качества воды, для питьевых и культурно-бытовых целей составляет 350 мг/л, для рыбохозяйственного назначения — 300 мг/л, при этом технологический регламент целого ряда промышленных предприятий Соликамско-Березниковского промышленного узла предписывает 100 мг/л.

Комплекс гидрологических и гидрохимических наблюдений, выполненных в рамках исследования Верхне-Зырянского водохранилища в 2021 г., включал в себя измерения удельной электропроводности и температуры воды с использованием универсального измерительного комплекса MIDAS ECM фирмы Valeport.

Вычислительные эксперименты, выполненные на основе построенной гидродинамической модели в 3D постановке [Lyubimova et al., 2021], показали, что границы раздела слоев водных масс устойчивы, они сохраняются при действующей конструкции водосбросного устройства даже при

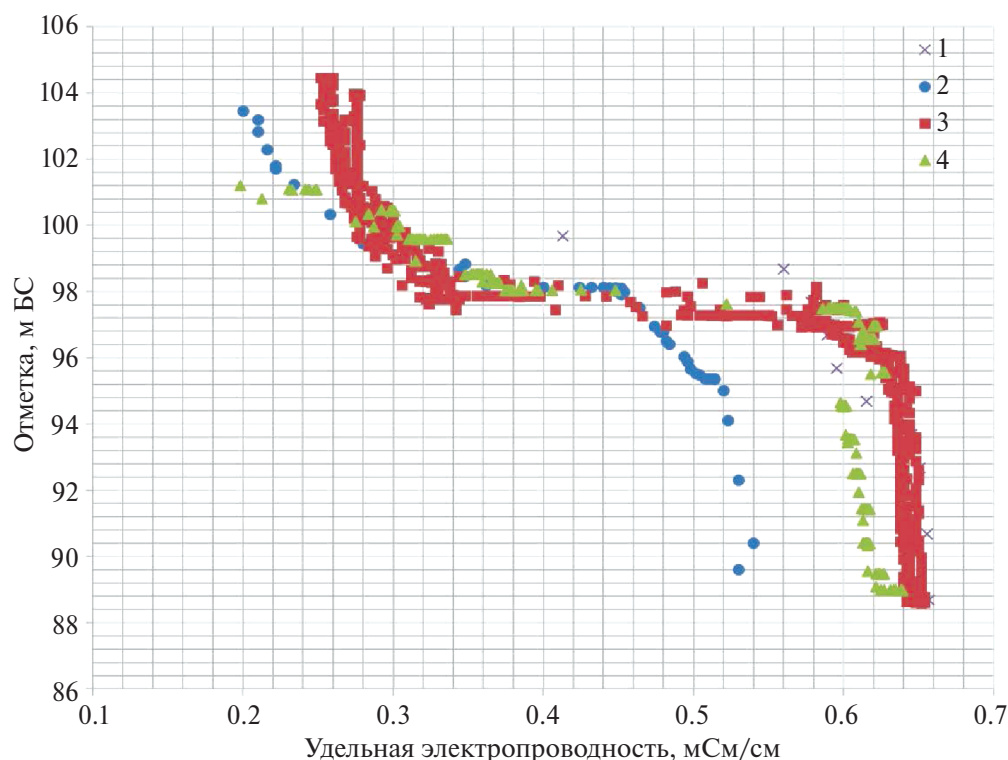


Рис. 2. Изменение удельной электропроводности воды по глубине в районе водозабора ЧОС (1 – апрель 2018 г., 2 – марта 2020 г., 3 – январь 2021 г., 4 – апрель 2021 г.).

максимальных расходах воды в период весеннего половодья.

Верхний участок Камского водохранилища в зоне переменного подпора в районе г. Березники. Данный участок Камского водохранилища в районе г. Березники находится в зоне переменного подпора от Камской ГЭС. Зона выклинивания подпора здесь при сработке водохранилища перемещается вниз по течению, как правило, это наблюдается в период предвесенней сработки уровня. В этом районе период естественного режима уровня составляет от 1 до 3,5 месяца. При уровнях близких к нормальному подпорному уровню (НПУ) подпор выклинивается на 50–70 км выше по течению – до п. Керчево. В период стояния уровня воды при отметках близких к НПУ, уровень воды и уклоны на данном участке водохранилища изменяются сравнительно плавно, при этом в большей мере они зависят от характера изменения стока воды р. Камы и в меньшей степени от режима регулирования. В период пониженных уровней наблюдаются резкие изменения уклонов водной поверхности.

Для анализа были использованы материалы 2021–2022 гг., которые включали в себя результаты отбора проб воды с частотой 4 раза в сутки, уклоны водной поверхности на исследуемом участке

водного объекта с частотой измерений 1/сутки, измерения. В ходе данного исследования было обнаружено, что в отличие от ситуации, наблюдаемой в Камском водохранилище на участке Чусовского плеса [Лепихин и др. 2021], описанной выше, когда вертикальная неоднородность водных масс наблюдается в течение всего зимнего периода, на данном участке Камского водохранилища вертикальная неоднородность водных масс может отмечаться лишь периодически в летний период, в течение непродолжительного промежутка времени.

Для анализа, описания рассматриваемых процессов используется сопряженная система гидродинамических моделей в 1D, 2D, 3D постановках [Любимова и др., 2022]. Использование такого громоздкого подхода связано с крайней ограниченностью как действующей наблюдательной сети, так и доступных ресурсов вычислительных средств.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Особенности формирования вертикальной плотностной стратификации и слоя скачка плотности на участке слияния двух находящихся в подпоре рек Чусовой и Сылвы были обсуждены в работе [Любимова и др., 2014] на основе

сопряжения материалов полевых исследований и вычислительных экспериментов в 3D постановке, выполненных в негидростатическом приближении.

Характерной, весьма интересной особенностью рассматриваемого явления является то, что вертикальная отметка расположения границы раздела водных масс (слой скачка) стабильна даже при условиях существенной сработки водохранилища. Так в 2021 году при сработке уровня воды водохранилища на 2.89 м ниже НПУ, положение границы раздела водных масс (слоя скачка) практически не изменилась.

В первом приближении, исходя из балансовых оценок, уровень границы раздела (слой скачка) оценивается следующим соотношением:

$$H_{ск}(t) = \frac{K_{сч}(t)}{1 + K_{сч}(t)} \cdot H(t), \quad (4)$$

где $H_{ск}(t)$ — глубина «слоя скачка», $H(t)$ — характерная глубина водохранилища в районе ЧОС, $K_{сч} = Q_c(t)/Q_q(t)$, где $Q_c(t)$, $Q_q(t)$ — расход воды, соответственно, в реках Сылва и Чусовая.

Специфической особенностью водосборной территории р. Сылвы является ее очень высокая закарстованность. Как следствие, снижение расходов воды в зимний период в данном водотоке происходит медленнее, чем в р. Чусовой, параметр

$$\frac{K_{сч}(t)}{1 + K_{сч}(t)}$$

возрастает в период с декабря по апрель, компенсируя, в определенной мере, в соотношении (4) снижение уровня воды в Камском водохранилище, вследствие его зимней сработки, что обеспечивает стабильность «слоя скачка».

Наличие существенной стратификации водных масс (вертикальный градиент электропроводности более 0.15 мСм/см/м) со стабильным расположением границы раздела водных масс в условиях повышенной жесткости забираемой воды на действующем водозаборе обусловило интерес к использованию данного эффекта для повышения эффективности системы водоснабжения г. Перми [Лепихин, 2017]. Так как на рассматриваемом водозаборе конструкционно было определено нижнее придонное расположение водозаборных окон для отсека поступления из придонных горизонтов более плотной, более минерализованной воды, характеризующейся

повышенной жесткостью, было предложено использование донных барьеров. Их конструктивные особенности и достигаемый при их реализации эффект рассматриваются в [Lyubimova et al., 2014]. В целом опыт селективного отбора проб воды с использованием донных барьеров позволил более чем в 2 раза снизить жесткость забираемой воды, обеспечив ее нормативное качество.

В то же время опыт эксплуатации данного селективного забора воды заставляет обращать внимание на эффекты, которые ранее игнорировались. При достаточной устойчивости расположения границы раздела водных масс в сезонном масштабе они характеризуются мелкомасштабными колебаниями. Как показали выполненные измерения, скорость течения (рис. 3) и ее направление характеризуются значительной внутрисуточной изменчивостью.

Колебания модуля скорости в течение суток, как показано на рис. 3, составляют от 0.01 до 0.08 м/с. Наблюдаемые изменения связаны с определенными фазами прохождения прямых и обратных волн, вызванных внутрисуточной неравномерностью попусков через КамГЭС [Lyubimova et al., 2020].

Режим сброса воды через плотину Камской ГЭС влияет не только на гидродинамику верхнего бьефа водохранилища, но и на качество забираемой на водозаборе воды. Существенный интерес представляют совмещенные значения расходов сброса воды через плотину КамГЭС (с часовым осреднением) и жесткости забираемой воды на ЧОС (рис. 4). Они наглядно демонстрируют роль попусков ГЭС в формировании гидродинамики водохранилища в районе оголовков водозабора, что значимо отражается на колебаниях качества (жесткости) воды, забираемой на водозаборе ЧОС. Для построения зависимости были использованы результаты многолетних полевых измерений и гидрохимических анализов, выполненных на водозаборе. На основании этих материалов была получена зависимость между жесткостью воды и электропроводностью с теснотой связи около 0.85–0.9.

Выполненные исследования показали, что в зоне слияния рек, характеризующихся различающимся гидрохимическим режимом и находящихся в подпоре от нижерасположенной ГЭС, может формироваться устойчивая стратификация водных масс, при этом на границу раздела

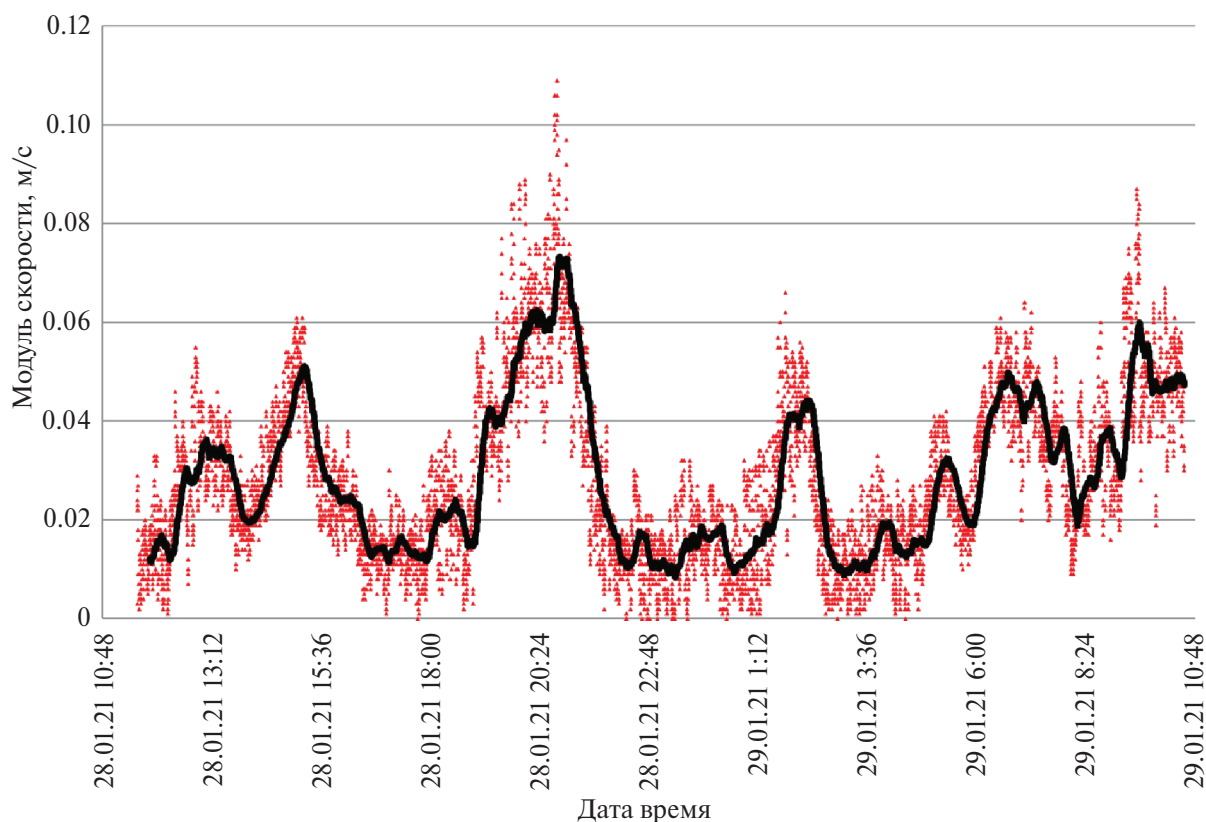


Рис. 3. Изменение модуля скорости течения по времени на отметке 97.5 м БС.

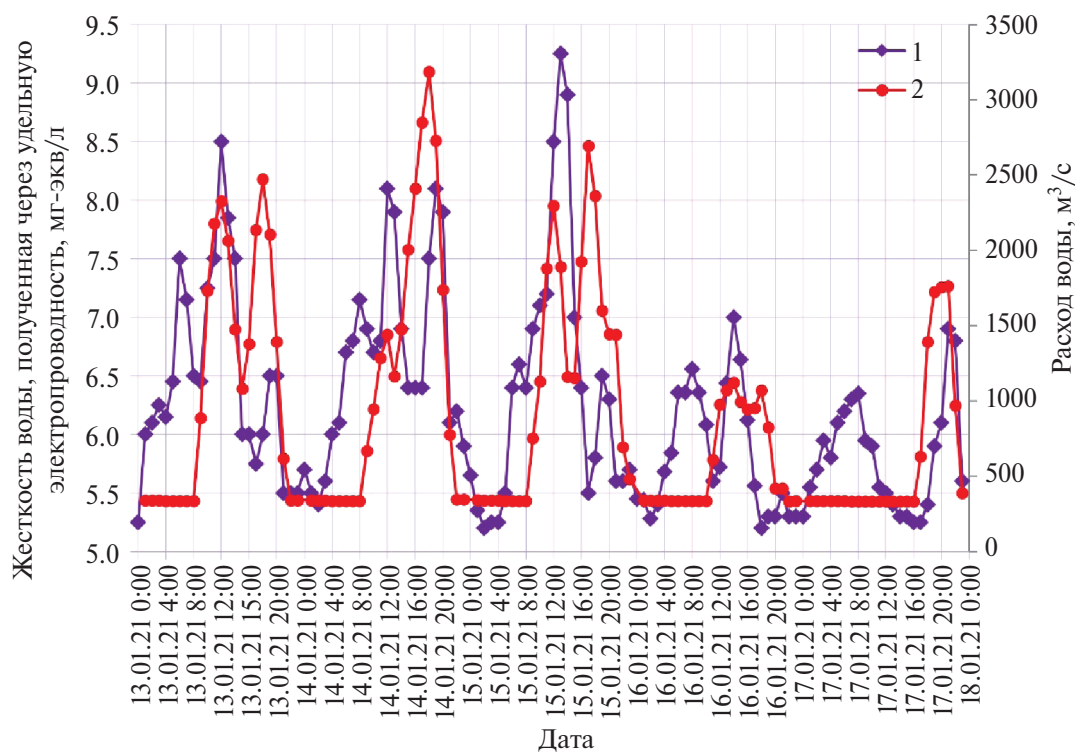


Рис. 4. Совмещенные хронологические графики расходов воды в нижний бьеф Камского гидроузла (2) и жесткости забираемой воды на ЧОС (1) (при существенной внутрисуточной неравномерности работы ГЭС).

водных масс может оказывать влияние и режим работы ГЭС.

Хотя данная схема формирования вертикальной неоднородности водных масс имеет очень существенное значение для обеспечения устойчивого функционирования систем водообеспечения, она достаточно экзотична. В зонах активного техногенеза схема формирования вертикальной стратификации водных масс принципиально другая.

Комплекс гидрологических и гидрохимических наблюдений Верхне-Зырянского водохранилища в зоне активного техногенеза показал, что минерализация воды, включающая основные макрокомпоненты, в первую очередь, хлориды, кальций, магний, калий, натрий, а соответственно, и удельная электропроводность воды неоднородны по глубине потока (рис. 5). Как следует из рисунка 5, содержание макрокомпонентов в поверхностных горизонтах водохранилища на порядок меньше, чем в придонном слое. Детальные кондуктометрические съемки показали, что максимальная удельная электропроводность воды наблюдается в затопленном старом русле реки.

При этом так называемый «слой скачка» — граница раздела водных масс, на котором происходит резкое изменение регистрируемой величины (электропроводности), находится на одной

глубине. Эта особенность водных масс является дополнительным фактором, способствующим формированию устойчивой вертикальной стратификации.

Так как при проектировании водохранилища не были предусмотрены донные водосливы, их промывка в весенний период невозможна. Как показали натурные наблюдения и выполненные вычислительные эксперименты [Lyubimova et al., 2021] при пропуске весеннего половодья «свежая» (паводковая), менее плотная вода «скользит» по более плотной воде, располагаемой в придонном слое. Поэтому забор воды, должен осуществляться из слоя, находящегося выше порога водослива. Этот слой воды, согласно результатам выполненных работ, в течение года активно промывается, в нем не наблюдается устойчивого роста минерализации.

Более сложный характер имеет вертикальная стратификация водных масс, наблюдаемая в Камском водохранилище в летний период в районе г. Березники. В зимний период как на фоновых, так и мониторинговых вертикалях, расположенных вблизи оголовков водозаборов, наблюдается устойчивая вертикальная однородность водных масс [Богомолов и др., 2021]. Если на фоновых станциях в летний период вертикальная однород-

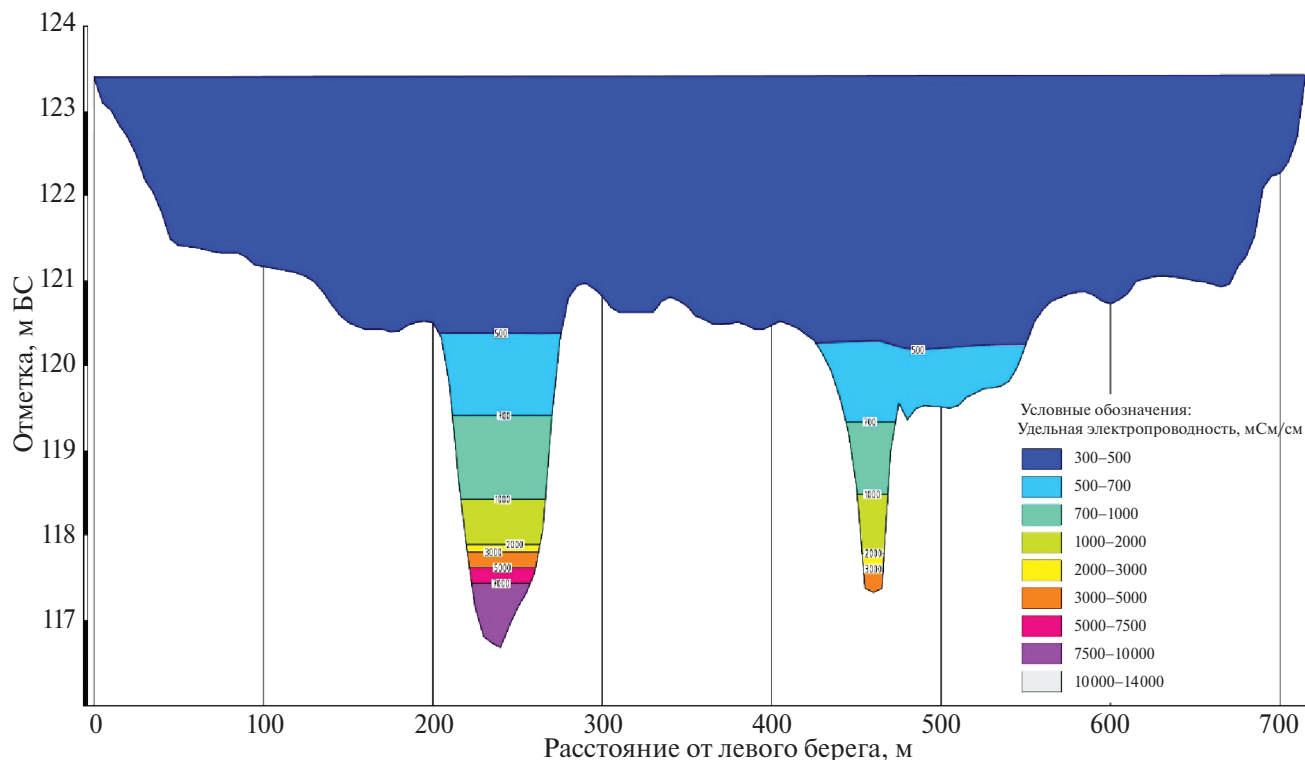


Рис. 5. Поперечный профиль распределения удельной электропроводности воды вдоль старого русла реки Зырянки.

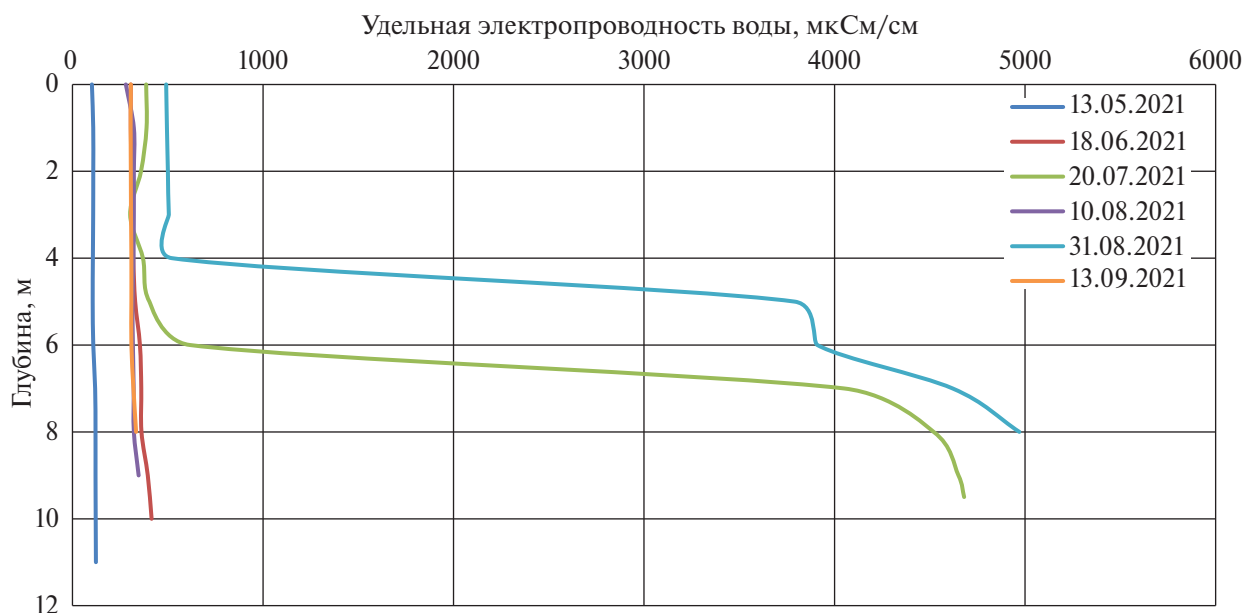


Рис. 6. Распределение по глубине удельной электропроводности воды на вертикале (вблизи оголовка водозабора).

ность водных масс сохранялась, то на станциях вблизи водозаборных оголовков в отдельные периоды наблюдается очень существенная вертикальная неоднородность водных масс (рис. 6), также данный эффект отмечается на хронологических графиках колебаний содержания хлоридов в воде, забираемой через глубинный водозабор (рис. 7).

Выполненный сопряженный комплекс натурных и вычислительных экспериментов позволил установить причину наблюдаемого явления. В зимний период, вследствие значительного снижения уровней воды в водохранилище, в нем наблюдаются скорости течения, достаточные для обеспечения эффективного вертикального перемешивания водных масс. В летний период при нормальном заполнении водохранилища глубина увеличивается примерно до 8 м, при этом скорость течения снижается практически на один порядок даже при прохождении более высоких расходов воды, чем в зимний период. При снижении скорости течения ниже критической величины, при которой $Fr < 1$, в придонной области начинает формироваться зона повышенной минерализации водных масс.

ВЫВОДЫ

В водохранилищах, характеризующихся малыми скоростями течений при числах Рейнольдса $Re > 1$ или плотностных числах Фруда $Fr < 1$, могут формироваться существенные вертикальные неоднородности водных масс. Наибольший ин-

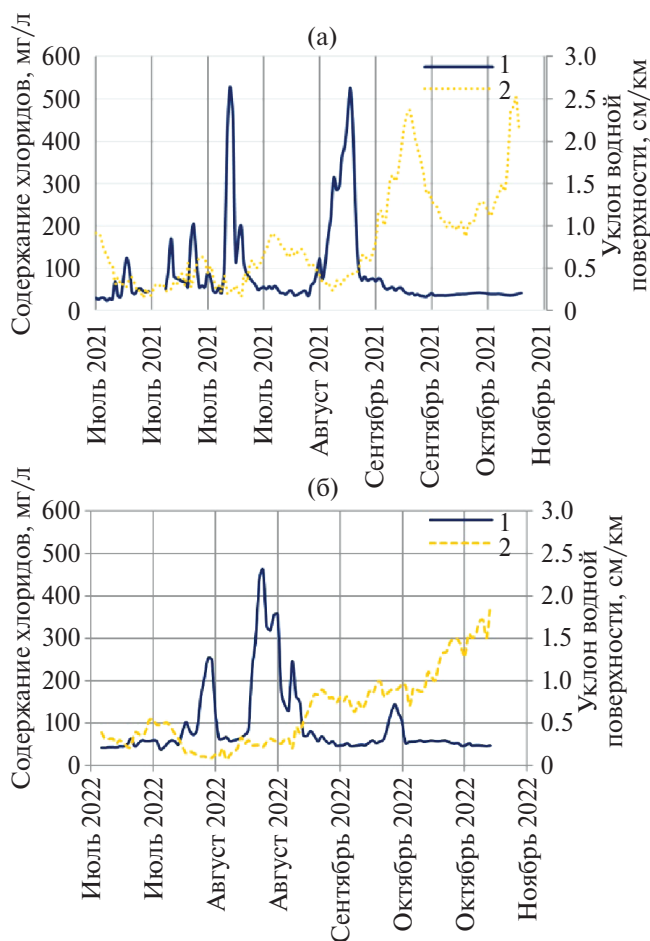


Рис. 7. Хронологические графики измеренных значений концентраций хлоридов в забираемой воде на водозаборе АО «БСЗ» (1) и уклона водной поверхности на рассматриваемом участке (2) в 2021 г. (а) и 2022 г. (б).

интерес, в первую очередь, для обеспечения питьевого и технического водоснабжения представляет ситуация, когда плотностная неоднородность обусловливается неравномерностью распределения по сечению потока минерализации воды. При этом факторы, обуславливающие поступление вод с повышенной минерализацией, могут быть различными, как при впадении рек с отличной минерализацией, чем в самом водохранилище, так и фильтрационная разгрузка подземных вод различного генезиса, что характерно для зон активного техногенеза.

Как показали выполненные исследования, внутрисуточная неравномерность работы ГЭС может отражаться на колебаниях границы раздела водных масс, что необходимо учитывать при организации оптимальных схем использования водохранилищ.

При создании водохранилищ в районе зон активного техногенеза необходимо предусматривать возможность их эффективной промывки во время прохождения весеннего половодья. В противном случае в придонной области может наблюдаться неуклонный рост минерализации воды, что принципиально затрудняет их практическое использование для целей водоснабжения.

Верхние части крупных водохранилищ, находящихся в зонах переменного подпора, весьма чувствительны к изменению гидрологического режима. На этих участках, а также на участках водохранилищ, расположенных в зонах активного техногенеза, в отдельные периоды при уровнях воды близких к НПУ может наблюдаться существенная стратификация водных масс, принципиально влияющая на характер их водопользования. При этом действующая в настоящее время система наблюдений Росгидромета за состоянием водохранилищ не способна выявить данные эффекты.

Для повышения устойчивости систем водоснабжения на подобных водных объектах необходима оценка условий формирования вертикальной неоднородности водных масс и их учет при проектировании водозаборных сооружений.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Пермского края в рамках Научного проекта № С-26/828 и Министерства Науки и Высшего образования РФ (Тема №. 121031700169–1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абакумов М. В., Ахметьев Н. П., Бреховских В. Ф. и др. Ивановское водохранилище: Современное состояние и проблемы охраны. М.: Наука, 2000. 344 с.
- Анциферов С. М., Косьян Р. Д. Взвешенные наносы в верхней части шельфа. М.: Наука, 1996. 224 с.
- Богомолов А. В., Лепихин А. П., Ляхин Ю. С., Гребенева М. Г. Особенности колебаний вертикальных структур полей минерализации в Камском водохранилище в период летней межени в районе г. Березники // Горное эхо. 2021. № 4 (85). С. 3–11.
- Квон Д. В., Квон В. И. Численный расчет термического режима Телецкого озера с учетом сжимаемости воды // Метеорология и гидрология. 1999. № 10. С. 96–102.
- Кременецкий В. В., Рыкунов Л. Н., Самолюбов Б. И. Циркуляционное плотностное течение // ДАН. Сер. Геофизика. 1997. Т. 357. № 4. С. 539–541.
- Лепихин А. П., Богомолов А. В., Ляхин Ю. С. К особенностям формирования качества воды р. Камы (Камского водохранилища) в зимний период в районе г. Березники // Горное эхо. 2022. № 1 (86). С. 13–25.
- Лепихин А. П., Возняк А. А., Любимова Т. П., Паршакова Я. Н., Ляхин Ю. С., Богомолов А. В. Исследование особенностей формирования и масштабов диффузного загрязнения, сформированного крупными промышленными комплексами, на примере Соликамско-Березниковского промузла // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 5. С. 560–566.
- Любимова Т. П., Лепихин А. П., Паршакова Я. Н., Богомолов А. В., Ляхин Ю. С. Влияние на качество отбираемой воды нестационарности скоростного режима водного объекта при наличии в нем плотностной стратификации // Вычислительная механика сплошных сред. 2022. Т. 15. № 2. С. 133–144.
- Пуклаков В. В. Роль плотностных течений во внутреннем водообмене водохранилища // Водные ресурсы. 1999. Т. 26. № 2. С. 161–169.
- Самохвалов Б. И. Плотностные течения и диффузия примесей. М.: ЛКИ, 2007. 350 с.
- Эдельштейн К. К. Водные массы долинных водохранилищ. М.: МГУ, 1991. 176 с.
- Becker, V., Caputo, L., Ordóñez, J., Marcé, R., Armengol, J., Crossetti, L. O., & Huszar, V. L. Driving factors of the phytoplankton functional groups in a deep Mediterranean reservoir // Water Research. 2010. V. 44. № 11. P. 3345–3354.
- Cantin, A., Beisner, B. E., Gunn, J. M., Prairie, Y. T., & Winter, J. G. Effects of thermocline deepening on lake plankton communities // Canadian Journal of Fisheries Aquatic Sciences. 2011. V. 68. № 2. P. 260–276.
- Chen, X., Wang, X., Wu, D., He, S., Kong, H., & Kawabata, Z. Seasonal variation of mixing depth and its influence on phytoplankton dynamics in the Zeya reservoir, China // Limnology. 2009. V. 10. № 3. P. 159–165.
- Chung, S. W., Hipsey, M. R., & Imberger, J. Modelling the propagation of turbid density inflows into a stratified lake: Daechong Reservoir, Korea // Environmental

- Modelling & Software. 2009. V. 24. № 12. P. 1467–1482. doi:10.1016/j.envsoft.2009.05.016
- Coates, M. J., & Patterson, J. C. Unsteady natural convection in a cavity with non-uniform absorption of radiation // *Journal of Fluid Mechanics*. 1993. V. 256. P. 133–161.
- Franca M. J. Density currents: theory and experimental results // Conference: XXXVI School of Hydraulics (<http://sh.igf.edu.pl/>) At: Jachranka, Poland. 2017.
- Gao, Q., He, G., Fang, H., Bai, S., & Huang, L. Numerical simulation of water age and its potential effects on the water quality in Xiangxi Bay of Three Gorges Reservoir // *Journal of Hydrology*. 2018.
- Li, Y., Sun, J., Lin, B., & Liu, Z. Thermal-hydrodynamic circulations and water fluxes in a tributary bay of the Three Gorges Reservoir // *Journal of Hydrology*. 2020. 124319.
- Liu, M., Zhang, Y., Shi, K., Zhang, Y., Zhou, Y., Zhu, M., Liu, M. Effects of rainfall on thermal stratification and dissolved oxygen in a deep drinking water reservoir // *Hydrological Processes*. 2020. V. 34. № 15. P. 3387–3399. doi:10.1002/hyp.13826
- Lyubimova T., Konovalov V., Parshakova Y., Lepikhin A., Tiunov A. Formation of the density currents in the zone of confluence of two rivers // *Journal of Hydrology*. 2014. T. 508. C. 328–342.
- Lyubimova T. P. Lepikhin A. P., Parshakova Y. N., Bogomolov A. V. Coherent structures at the interface between water masses of confluent rivers // *Water*. 2022. V. 14. № 8. P. 1308.
- Lyubimova T., Lepikhin A., Parshakova Y., Bogomolov A., Lyakhin Y. The influence of intra-day non-uniformity of operation of large hydroelectric powerplants on the performance stability of water intakes located in their upper pools // *Water*. 2021. V. 13. № 24. P. 3577.
- Lyubimova T., Lepikhin A., Parshakova Y., Bogomolov A., Lyakhin Y., Tiunov A. Peculiarities of hydrodynamics of small surface water bodies in zones of active technogenesis (on the example of the Verkhne-Zyryansk reservoir, Russia) // *Water*. 2021. V. 13. № 12. P. 1638.
- Lyubimova T., Parshakova Y., Lepikhin A., Lyakhin Y., Tiunov A. The effect of unsteady water discharge through dams of hydroelectric power plants on hydrodynamic regimes of the upper pools of waterworks // *Water*. 2020. V. 12. № 5. P. 1336.
- Morovati, K., Tian, F., Kumm, M., Shi, L., Tudaji, M., Nakhaei, P., & Olivares, M. A. Contributions from Climate Variation and Human Activities to Flow Regime Change of Tonle Sap Lake from 2001 to 2020 // *Journal of Hydrology*. 2022. 128800.
- Munoz, D. H., Constantinescu, G., Rhoads, B., Lewis, Q., & Sukhodolov, A. Density Effects at a Concordant Bed Natural River Confluence // *Water Resources Research*. 2020. V. 56. № 4.
- Noori, R., Tian, F., Ni, G., Bhattarai, R., Hooshyaripor, F., & Klove, B. ThSSim: A novel tool for simulation of reservoir thermal stratification // *Sci Rep*. 2019. V. 9. № 1. P. 18524. doi:10.1038/s41598-019-54433-2
- Saber, A., James, D. E., & Hayes, D. F. Effects of seasonal fluctuations of surface heat flux and wind stress on mixing and vertical diffusivity of water column in deep lakes // *Advances in Water Resources*. 2018. V. 119. P. 150–163. doi:10.1016/j.advwatres.2018.07.006
- Simpson, J. H., Woolway, R. I., Scannell, B., Austin, M. J., Powell, B., & Maberly, S. C. The Annual Cycle of Energy Input, Modal Excitation and Physical Plus Biogenic Turbulent Dissipation in a Temperate Lake // *Water Resources Research*. 2021. V. 57. № 6. doi:10.1029/2020wr029441
- Webster, C. A. G. An experimental study of turbulence in a density-stratified shear flow // *Journal of Fluid Mechanics*. 2006. V. 19. № 2. doi:10.1017/s0022112064000672
- Woolway, R. I., & Merchant, C. J. Amplified surface temperature response of cold, deep lakes to inter-annual air temperature variability // *Sci Rep*. 2017. V. 7. № 1. P. 4130. doi:10.1038/s41598-017-04058-0
- Xie, Q., Liu, Z., Fang, X., Chen, Y., Li, C., & MacIntyre, S. Understanding the Temperature Variations and Thermal Structure of a Subtropical Deep River-Run Reservoir before and after Impoundment // *Water*. 2017. V. 9. № 8. P. 603. doi:10.3390/w9080603
- Yang, L., Liu, D., Huang, Y., Yang, Z., Ji, D., & Song, L. Isotope analysis of the nutrient supply in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir // *Ecological Engineering*. 2015. V. 77. P. 65–73. doi:10.1016/j.ecoleng.2015.01.013
- Zhang, Y., Wu, Z., Liu, M., He, J., & Yu, Z. Thermal structure and response to long-term climatic changes in Lake Qiandaohu, a deep subtropical reservoir in China // *Limnology Oceanography*. 2014. V. 59. № 4. P. 1193–1202.

DENSITY EFFECTS OF DIFFERENT GENESIS IN LOWLAND RESERVOIRS**A. P. Lepikhin^{1,*}, T. P. Lyubimova², A. V. Bogomolov¹, Yu. S. Lyakhin¹, Ya. N. Parshakova²**¹*Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Kama branch, Perm, Russia*²*Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia***e-mail: lepihin49@mail.ru*

Features of formation of vertical stratification of water masses in reservoirs caused by heterogeneity of distribution of water mineralization are considered. These effects with different genesis are considered on the example of three specific significantly different water bodies. As a first example, the Kama reservoir in the confluence of the Sylva and Chusovaya rivers is considered, characterized in winter by a significantly different hydrochemical regime. In the zone of their confluence in winter, vertical stratification of water masses is formed, which is used to significantly reduce the rigidity of water masses. It has been shown that the intra-day unevenness of the operation of the Kama hydroelectric power station significantly affects the fluctuations in the boundary of water masses. At the same time, the position of the water mass interface itself is very stable relative to the seasonal operation of the reservoir. As a second example, a small reservoir located in the zone of active technogenesis is considered, characterized by filtration discharges of highly mineralized groundwater. If the observed stratification of water masses in these examples is quite stable during the whole season, then in the third considered example – the Kama reservoir in the area of Berezniki, located in the zone of support pinching out, it is very short-lived, it can only be observed for several days. Despite its relative short duration, it is very significant for ensuring a sustainable water supply. Factors determining duration of observation of vertical heterogeneity of water masses of water bodies are considered.

Keywords: reservoir, stratification, mineralization, water supply stability