

Гидрология

Лепихин А.П., Любимова Т.П., Богомолов А.В.,
Опутин М.А. Синцова Т.Н.

Научная статья

УДК 556.555.7

doi: 10.17072/2079-7877-2024-3-70-82

**ОСОБЕННОСТИ ВНУТРИСУТОЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ВОДЫ,
НАБЛЮДАЕМЫХ В КАМСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ**Анатолий Павлович Лепихин¹, Татьяна Петровна Любимова², Андрей Владимирович Богомолов³,
Максим Андреевич Опутин⁴, Татьяна Николаевна Синцова⁵^{1, 3, 4, 5} Горный институт УрО РАН, г. Пермь, Россия² Институт механики сплошных сред УрО РАН, г. Пермь, Россия¹ lepihin49@mail.ru, Scopus Author ID: 56370650100, SPIN-код: 7621-8001, Author ID: 147950² lyubimovat@mail.ru, Scopus Author ID: 7003528531, SPIN-код: 1864-7298, Author ID: 6478³ whitewing85@mail.ru, Scopus Author ID: 57211970385, SPIN-код: 2835-5475, Author ID: 1004685⁴ maksimoputka@yandex.ru, Author ID: 1237235, SPIN-код: 7710-7577⁵ tanya_sinzova@mail.ru, Scopus Author ID: 57474212500, SPIN-код: 7569-1702, Author ID: 1226076

Аннотация. Для решения широкого круга задач, связанных с охраной и их рациональным использованием, принципиальное значение имеет оценка колебаний изменчивости показателей их химического состава. При этом, как правило, рассматриваются и анализируются сезонные, месячные колебания. Это было связано, в первую очередь, с особенностями действующей системы мониторинга. Переход на автоматизированные системы измерений дает возможность исследовать и анализировать значительно более короткопериодные процессы, такие как межсуточные и внутрисуточные колебания.

В настоящее время эти колебания показателей качества воды в водохранилищах являются недостаточно исследованными, хотя они играют важную роль как в формировании потребительских свойств воды, так и в обеспечении экологической безопасности водных объектов. В первую очередь, данные колебания особенно актуальны для водных объектов, расположенных в зонах активного техногенеза, являющихся важнейшими источниками водоснабжения крупнейших промышленных комплексов.

В статье рассматриваются процессы, фиксируемые на двух участках Камского водохранилища: нижнем, непосредственно прилегающем к Камской ГЭС, и верхнем, находящемся в зоне выклинивания его подпора. На нижнем участке качество забираемой воды в зимний период характеризуется ярко выраженными межсуточными и внутрисуточными колебаниями, обуславливаемыми значительными изменениями расходов сброса воды в нижнем бьефе. В то же время на верхнем участке водохранилища, находящемся в зоне выклинивания подпора, данные колебания наблюдаются в теплый период при формировании вертикальной стратификации водных масс. Эти явления фиксируются при значительном снижении уклонов водной поверхности и, соответственно, снижении скоростей течений.

Ключевые слова: водохранилища, качество воды, водоснабжение, вертикальная стратификация

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), в рамках государственного задания Горного института УрО РАН (рег. номер НИОКТР: 124020500053-6).

Для цитирования: Лепихин А.П., Любимова Т.П., Богомолов А.В., Опутин М.А., Синцова Т.Н. Особенности внутрисуточных колебаний показателей качества воды, наблюдаемых в Камском водохранилище // Географический вестник = Geographical bulletin. 2024. № 3 (70). С. 70–82. doi: 10.17072/2079-7877-2024-3-70-82

Original article

doi: 10.17072/2079-7877-2024-3-70-82

**FEATURES OF INTRADAY FLUCTUATIONS IN WATER QUALITY INDICATORS OBSERVED
IN THE KAMA RESERVOIR**Anatoly P. Lepikhin¹, Tatyana P. Lyubimova², Andrey V. Bogomolov³, Maksim A. Oputin⁴, Tatyana N. Sintsova⁵^{1, 3, 4, 5} Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia² Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia¹ lepihin49@mail.ru, Scopus Author ID: 56370650100, SPIN-код: 7621-8001, Author ID: 147950² lyubimovat@mail.ru, Scopus Author ID: 7003528531, SPIN-код: 1864-7298, Author ID: 6478³ whitewing85@mail.ru, Scopus Author ID: 57211970385, SPIN-код: 2835-5475, Author ID: 1004685⁴ maksimoputka@yandex.ru, Author ID: 1237235, SPIN-код: 7710-7577⁵ tanya_sinzova@mail.ru, Scopus Author ID: 57474212500, SPIN-код: 7569-1702, Author ID: 1226076

Abstract. To solve a wide range of problems related to the protection and rational use of water bodies, it is fundamentally important to assess fluctuations in the variability of indicators of their chemical composition. In this case, as a rule, seasonal and



Гидрология

Лепихин А.П., Любимова Т.П., Богомолов А.В.,
Опутин М.А. Синцова Т.Н.

monthly fluctuations are considered and analyzed. This is due, most of all, to the features of the current monitoring system. The transition to automated measurement systems makes it possible to study and analyze much shorter-period processes, such as inter- and intra-day fluctuations.

Currently, these fluctuations in water quality indicators in reservoirs are an insufficiently studied phenomenon, although they play an important role both in shaping the consumer properties of water and ensuring the environmental safety of water bodies. These fluctuations are especially relevant for water bodies located in zones of active technogenesis, which are the most important sources of water supply for the largest industrial complexes.

The article examines the processes recorded in two sections of the Kama Reservoir: the lower one, directly adjacent to the Kama Hydroelectric Power Station, and the upper one, located in the zone of pinching out of its backwater. In the lower section, the quality of water taken in winter is characterized by pronounced inter- and intra-day fluctuations caused by significant changes in water discharge rates in the lower pool. At the same time, in the upper section of the reservoir, located in the zone of backwater wedging out, these fluctuations are observed in the warm period, during the formation of vertical stratification of water masses. These phenomena occur with a significant decrease in the slopes of the water surface and, accordingly, a decrease in current speeds.

Keywords: reservoirs, water quality, water supply, vertical stratification

Funding: The study was carried out with financial support from the Government of the Perm Territory, as part of scientific project No. S-26/828, and from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic No. 121031700169-1), as part of the state assignment of the Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (No: 124020500053-6).

For citation: Lepikhin, A.P., Lyubimova, T.P., Bogomolov, A.V., Oputin, M.A., Sintsova, T.N. (2024). Features of intraday fluctuations in water quality indicators observed in the Kama Reservoir. *Geographical Bulletin*. No. 3(70). Pp. 70–82. doi: 10.17072/2079-7877-2024-3-70-82

Введение

Колебания качества воды в водохранилищах представляют значительный практический и теоретический интерес. При этом традиционно основное внимание уделяется сезонным, а также междугодовым колебаниям [18; 20; 33]. Однако в последние годы в связи с совершенствованием систем наблюдений значительное внимание стало уделяться более короткопериодным, в том числе и внутрисуточным колебаниям [5; 16–17; 29; 30–32].

Внутрисуточные колебания играют принципиально важную роль в обеспечении устойчивости функционирования систем как питьевого, так и промышленного водопользования. В силу своего генезиса они достаточно локальны, в то же время они, в отличие от более быстропротекающих процессов, не могут быть устранены путем создания некоторых усреднительных емкостей.

Кратковременность рассматриваемых процессов делает практически невозможным их исследование с использованием традиционных схем оценки измеряемых поллютантов в воде, а также традиционных химических методов определения. Необходим переход на физические способы измерений. В настоящее время эти схемы измерений очень активно разрабатываются. Весьма эффективным способом измерений содержания лимитирующих показателей качества воды является измерение удельной электропроводности воды. Данный показатель, с одной стороны, очень тесно связан с макрокомпонентным составом воды, с другой стороны, современные технологии позволяют очень удобно определять его в автоматическом режиме.

При анализе рассматриваемых колебаний ключевой является проблема установления механизмов, обуславливающих наличие таких достаточно быстро протекающих колебаний химического состава воды, так как гидрологические процессы, тем более в зимний период, характеризуются значительной инерционностью.

В зонах активного техногенеза наиболее естественно связывать подобные кратковременные процессы, в первую очередь, с несанкционированным, недекларируемым отведением сточных вод при различных аварийных и нештатных ситуациях.

Однако данные явления, как правило, носят нерегулярный характер, при этом современные технологии позволяют достаточно эффективно вычленять, идентифицировать возможные несанкционированные воздействия на водные объекты. Поэтому значительно больший интерес представляет установление связей этих колебаний с внутриводоемными процессами.

Так как колебания наблюдаются в водных объектах только при формировании в них устойчивой стратификации водных масс с отчетливо выраженной границей раздела сред, при этом представляется вполне естественным связать эти колебания качества воды с факторами, влияющими на положение границы раздела этих сред.

Гидрология

Лепихин А.П., Любимова Т.П., Богомолов А.В.,
Опутин М.А. Синцова Т.Н.

**Чусовской плес Камского водохранилища,
район Чусовских очистных сооружений (ЧОС)**

Основной водозабор питьевой воды г. Перми – ЧОС – расположен непосредственно ниже зоны слияния рек Сылвыи Чусовой, находящихся в подпоре от плотины Камской ГЭС (рис. 1). В ранее проведенных исследованиях была выявлена [6; 9; 23] важная особенность данного района водохранилища – водные массы в зимний период характеризуются значительной вертикальной неоднородностью. В придонных горизонтах транспортируются более плотные воды, обладающие повышенной жесткостью воды р. Сылвы, достигающей 13–14 единиц, а в приповерхностных горизонтах – менее плотные воды р. Чусовой с меньшей жесткостью воды.



Рис. 1. Исследуемые участки реки Камы
(Камского водохранилища)
Fig. 1. Location of the investigated areas
on the Kama River (Kama Reservoir)

Жесткость воды является лимитирующим показателем на рассматриваемом водозаборе ЧОС, поскольку водные массы, приходящие по р. Сылве, высокоминерализованы из-за закарстованности речного бассейна. Однако общая минерализация воды и жесткость, являясь химическими показателями, требуют для своего определения достаточно сложной громоздкой процедуры. Поэтому при проведении полевых исследований значительно удобнее использовать непосредственно измеряемый показатель – удельную электропроводность воды (рис. 2).

Основным преимуществом применения данного показателя является, как уже отмечалось, удобство его определения при наличии очень хорошей линейной связи с минерализацией и жесткостью воды.

Высокая закарстованность водосборной территории р. Сылвы обуславливает не только повышенную жесткость ее воды, но также повышенную минерализацию и плотность по сравнению с водой р. Чусовой. Данные различия становятся особенно заметными в период зимней межени, когда эти реки переходят преимущественно на подземный режим питания. В зоне слияния рек наблюдается отчетливая вертикальная стратификация водных масс с устойчивой границей раздела. Для снижения жесткости забираемой воды был предложен селективный забор воды путем создания донных барьеров на оголовки водозабора [9; 11]. При этом высота донного барьера близка к высоте расположения границы водных масс – к так называемому «слою скачка», где наблюдается резкое изменение качества воды.

Близость данного участка к плотине Камской ГЭС (расстояние до гидроузла составляет порядка 16 км) обуславливает значительное влияние на гидродинамический режим исследуемого участка водоема в связи с неравномерностью сбросов воды из верхнего бьефа ГЭС в нижний (резкие изменения сбросных расходов воды через плотину гидроузла).

Гидрология

Летихин А.П., Любимова Т.П., Богомолов А.В.,

Опутин М.А. Синцова Т.Н.

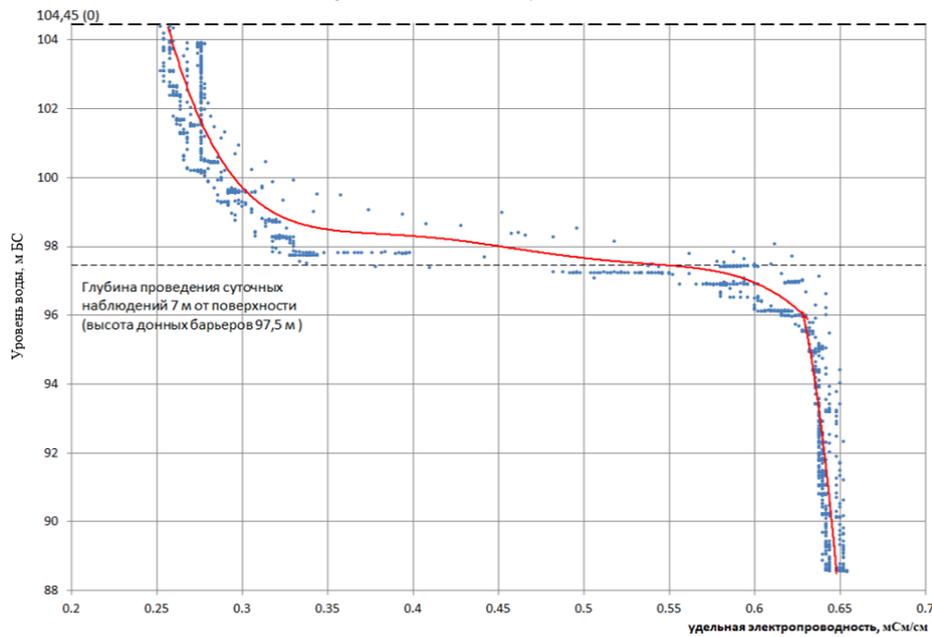


Рис. 2. Изменение по глубине удельной электропроводности воды в районе ЧОС (28 января 2021 г.)
 Fig. 2. Change in specific electrical conductivity of water near the Chusovskie Water Purification Plant (January 28, 2021)

Особенности и масштабы внутрисуточных колебаний качества воды

Большинство крупных ГЭС из-за особенностей их регулирования, в первую очередь, ориентированы на снятие внутрисуточных неравномерностей потребления электроэнергии. В таком режиме работает и Камская ГЭС. Резкие изменения расходов сброса воды в нижнем бьефе порождают в верхнем бьефе внутренние волны на границе раздела водных масс. Так как высота донных барьеров, определяющих эффективность селективного отбора воды, достаточно близка к границе раздела водных масс, возмущения, связанные с неравномерностью сбросов, отчетливо отражаются на качестве забираемой воды. Представленная информация на рис. 3, 4 наглядно демонстрирует особенности внутринедельного и внутрисуточного регулирования сбросов воды через гидроузел Камской ГЭС.

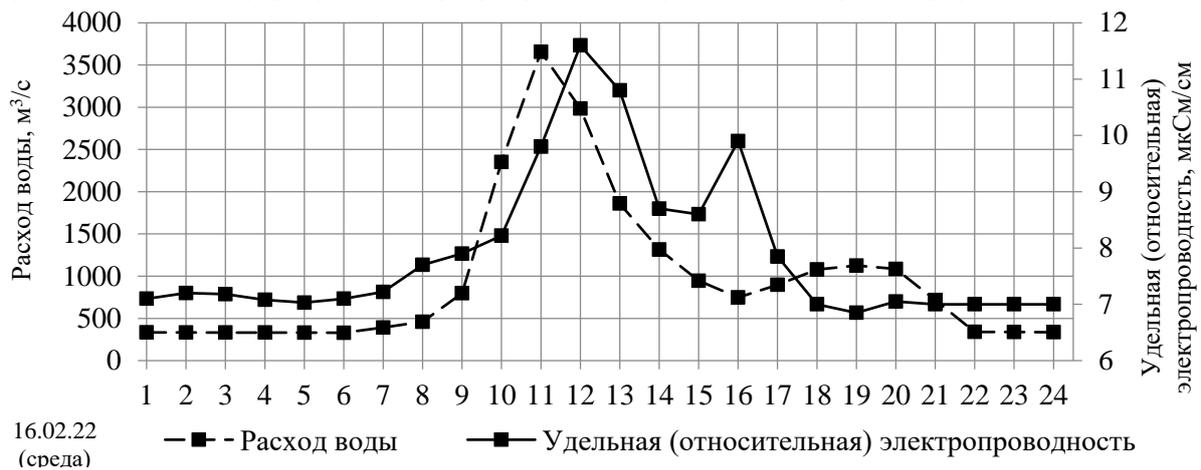


Рис. 3. Синхронный график внутрисуточных изменений расхода воды и удельной электропроводности
 Fig. 3. Synchronous graphs of intraday fluctuations in water discharge and electrical conductivity

При этом значимое, существенное влияние на качество забираемой воды оказывают наиболее масштабные сбросы воды в нижний бьеф через плотину Камской ГЭС. При малых сбросах воды влияние практически отсутствует.

Гидрология

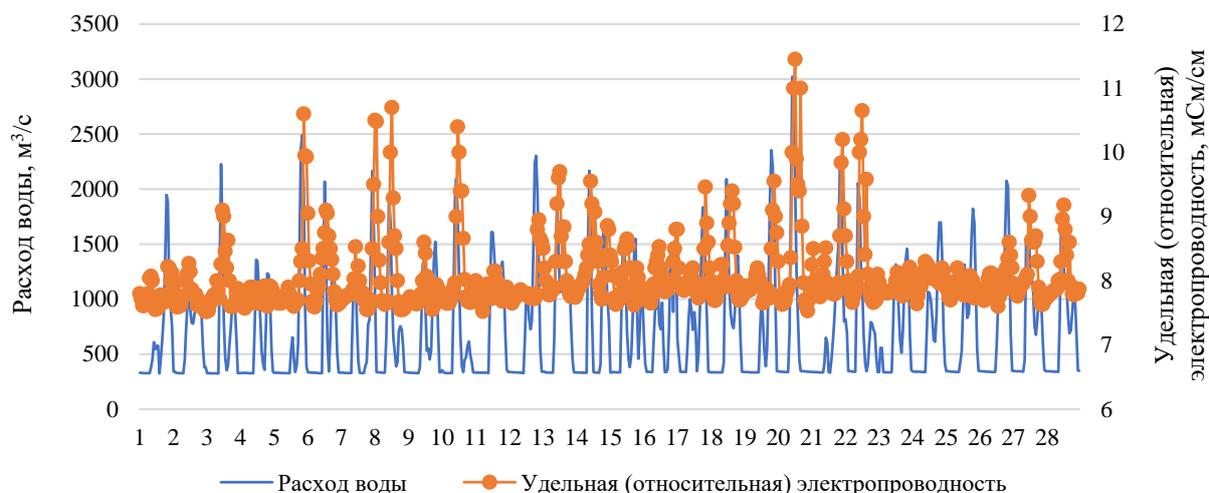
Лепихин А.П., Любимова Т.П., Богомолов А.В.,
Опунин М.А. Синцова Т.Н.

Рис. 4. Синхронный график изменений расхода воды и удельной электропроводности (февраль 2022 г.)
Fig. 4. Synchronous graphs of fluctuations in water discharge and electrical conductivity (February 2022)

Рассматриваемая особенность отражает серьезный нелинейный характер формируемых на границе раздела водных масс внутренних волн. Данные внутрисуточные колебания качества воды значительны и требуют принятия эффективных мер по минимизации их влияния.

Особенности гидрологического и гидрохимического режима р. Камы (Камского водохранилища) в районе г. Березники

Рассматриваемый район водохранилища расположен в зоне выклинивания подпора, в 200 км выше Камской ГЭС. На данном участке водохранилища наблюдается значительная внутригодовая динамика уровненного режима воды, в отдельные годы колебания уровня превышают 7 м, что обусловлено сезонным регулированием водохранилища. Характерной особенностью данного участка водохранилища, представленного на рис. 1, является очень высокая техногенная нагрузка, связанная как с точечными, так и с диффузными источниками загрязнения [1; 4; 7; 8; 21]. Для этой зоны характерны фильтрационные разгрузки подземных высокоминерализованных вод как естественного, так и техногенного генезиса. Исходя из особенностей генезиса гидрохимического режима р. Камы, в рассматриваемом районе основным лимитирующим показателем качества воды является содержание хлоридов. Для этого показателя установлена устойчивая зависимость между содержанием хлорид-ионов в воде и ее удельной электропроводностью

$$Cl = 0.271 * \kappa - 31.9, \quad (1)$$

где Cl – концентрация хлорид-ионов, мг/л; κ – удельная электропроводность, мСм/см, при тесноте связи $R^2 = 0.96$. Соответственно, хлориды и в совокупности другие макрокомпоненты, тесно связанные с ними, вносят доминирующий вклад в формирование удельной электропроводности воды на данном участке р. Камы.

Характерной особенностью данных колебаний является то, что они наблюдаются только при формировании вертикальной неоднородности водных масс (рис. 5), свойственной р. Каме (Камскому водохранилищу) в районе г. Березники в теплый период. Это явление наглядно демонстрируется на профилях распределения удельной электропроводности воды в районе водозабора АО «БСЗ» (рис. 5).

Впервые рассматриваемый эффект был обнаружен Г.И. Куликовым [3] еще в 1959 г. при проведении первой детальной съемки Камского водохранилища после его наполнения. К сожалению, на данное явление не обращалось должного внимания, и оно практически не изучалось.

Гидрология

Лепихин А.П., Любимова Т.П., Богомолов А.В.,

Опутин М.А. Синцова Т.Н.

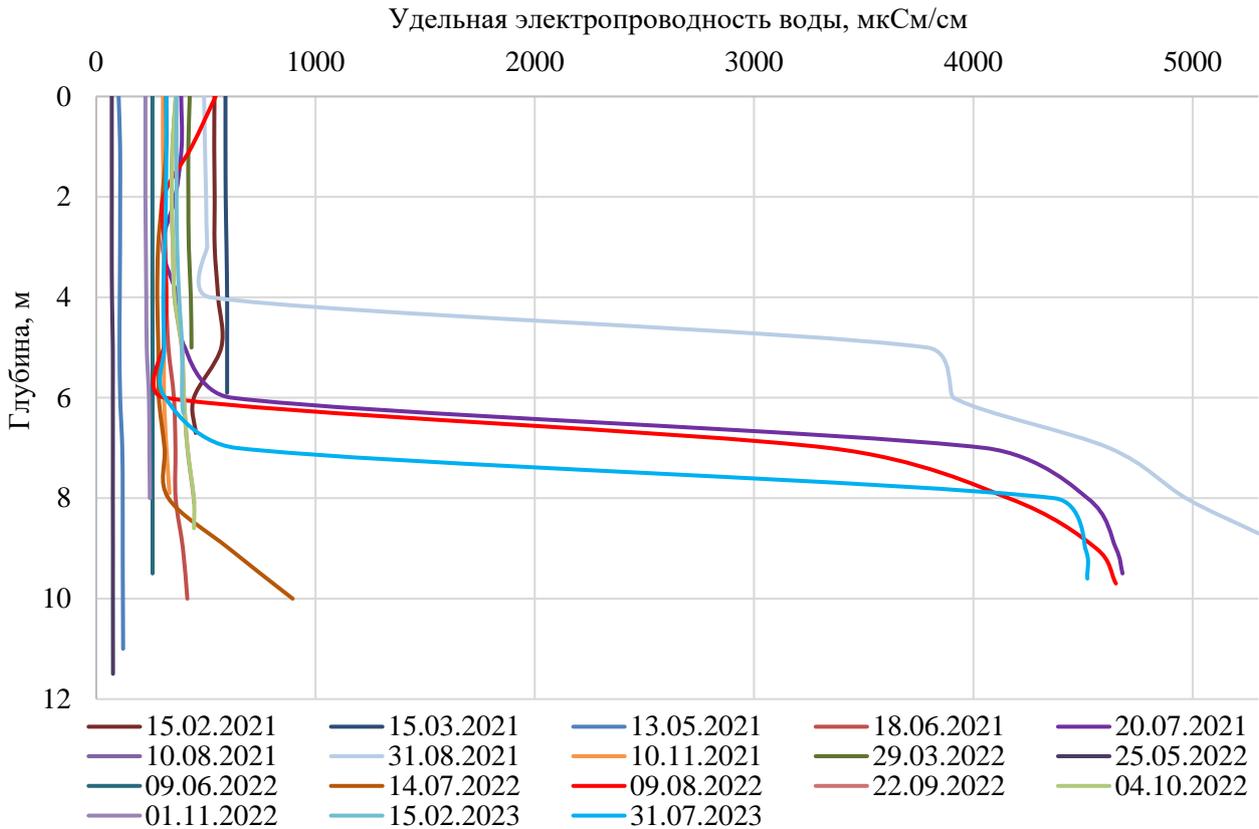


Рис. 5. Распределение по глубине удельной электропроводности воды в районе г. Березники (водозабор АО «БСЗ») за 2021–2023 гг.

Fig. 5. Distribution by depth of specific electrical conductivity of water in the Berezniki area (water intake of 'BSZ' LLC) for 2021 – 2023

Как показал выполненный анализ, существенная вертикальная стратификация водных масс формируется, когда плотностное число Фруда $Fr_p < 1$. При этом необходимо учитывать это плотностное число Фруда

$$Fr_p \approx \frac{1}{\sqrt{Ri}}, \quad (2)$$

где Ri – градиентное число Ричардсона,

$$Fr_p = \frac{V}{\left(\frac{\Delta\rho}{\rho} \cdot g \cdot H_r\right)^{1/2}}, \quad (3)$$

где V – характерная скорость потока; $\Delta\rho/\rho$ – относительное различие плотности воды между слоями. Так как

$$V = C \cdot (H \cdot i)^{1/2}, \quad (4)$$

где C – коэффициент Шези; i – уклон водной поверхности; H_r – расположения границы раздела водных масс, при $H_r \sim H/2$, учитывая эти соотношения, имеем для оценки критического значения уклона водной поверхности

$$i_{кр} < \frac{(\Delta\rho/\rho)}{2 \cdot Fr_p^2 \cdot C^2/g}. \quad (5)$$

Поскольку для рассматриваемого участка р. Камы $C \sim 45$, то $\frac{C}{\sqrt{g}} \sim 14,4$, а при характерных значениях $\Delta\rho/\rho \sim 10^{-3}$ будет иметь место число $Fr_p \sim 1$ при снижении уклона до $i \sim 0,5 \cdot 10^{-5}$, или 0,5 см/км, т.е. стратификация становится устойчивой, а интенсивность вертикального перемешивания резко снижается.

Для того чтобы были проанализированы и установлены внутриводоемные причины колебаний суточных и тем более внутрисуточных масштабов, необходима информация с такой же детальностью и

Гидрология

Лепихин А.П., Любимова Т.П., Богомолов А.В.,
Опунин М.А. Синцова Т.Н.

гидрологических процессов. К сожалению, в настоящее время на рассматриваемом участке водохранилища проводятся регулярные наблюдения только за уровнем по гидрологическим постам пгт Тюлькино и г. Березники с представлением информации только раз в сутки – на 8 часов утра. Исходя из данной информации, трудно оценить гидродинамические характеристики рассматриваемого водного потока, даже оценить гидравлический уклон р. Камы (Камского водохранилища) на данном участке.

Оценка значений уклонов водной поверхности, полученных на основе анализа фактических данных только по двум водомерным постам, не отражает реальную картину распределения уклонов на всем участке от пгт Тюлькино до г. Березники. Так как данный участок водохранилища находится в зоне переменного подпора, в связи с этим на нем возможен достаточно сложный характер как распределения гидравлических уклонов по протяженности рассматриваемого участка, так и его связи со скоростями течения.

Поэтому с целью получения объективной оценки значений уклонов на рассматриваемом участке от пгт Тюлькино до г. Березники были проведены гидравлические расчеты в 1D-постановке с использованием программного продукта HEC-RAS 5.0 [19].

Расчеты были проведены для следующих типичных сценариев наблюдаемых гидрологических режимов:

- 1) Стабильный поддерживаемый уровень НПУ (108,5 м БС) при стабильном притоке по пгт Тюлькино;
- 2) Поддерживаемый уровень воды составляет 105,35 м БС, при этом наблюдается снижение притока воды по пгт Тюлькино на $50 \text{ м}^3/\text{с}$ в сутки;
- 3) Поддерживаемый уровень воды составляет 105,35 м БС при стабильном притоке воды;
- 4) Уровень воды поддерживается на отметке \sim НПУ (108,5 м БС) при интенсивности снижения притока воды $100 \text{ м}^3/\text{с}$ в сутки и относительно резком изменении уровней на $0,15 \text{ м}/\text{сут}$.

Результаты расчетов представлены на рис. 6.

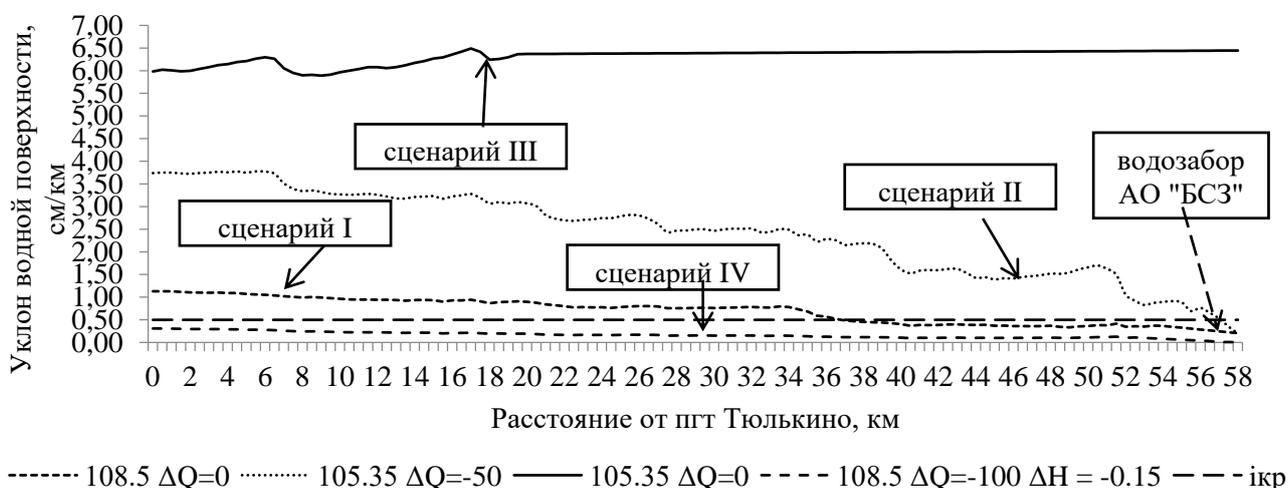


Рис. 6. Изменения уклона водной поверхности на участке от пгт Тюлькино до г. Березники при различных условиях

Fig. 6. Changes in the slope of the water surface in the area from the urban-type settlement Tyulkinovo to the city of Berezniki under different conditions

Как следует из рис. 6, распределение уклонов водной поверхности на рассматриваемом участке существенно неоднородно. При этом на характер распределения водной поверхности определяющее значение оказывают уровень воды, поддерживаемый в водохранилище, и режим изменения притока воды по посту р. Камы – пгт Тюлькино, если при уровнях воды, близких к НПУ (108,50 м), распределение уклонов водной поверхности достаточно однородно на всем участке вне зависимости от динамики притока пгт Тюлькино. В то же время при уровнях воды, характерных для августа-октября 2023 г., $\sim 105,40 \text{ м}$ и одновременном существенном падении расходов по пгт Тюлькино, наблюдается значительная неоднородность распределения уклонов. Расчетные уклоны водной поверхности на данном участке изменяются более чем на порядок.

Гидрология

Летихин А.П., Любимова Т.П., Богомолов А.В.,

Опунин М.А. Синцова Т.Н.

**Внутрисуточные колебания качества воды в р. Каме
(Камском водохранилище) в районе г. Березники**

В зимний период при значительной сработке водохранилища скорости течения существенно выше, чем фиксируемые в теплый период, поэтому вертикальная стратификация водных масс и внутрисуточные колебания минерализации воды не наблюдаются.

Как было показано выше, малые уклоны на рассматриваемом участке водохранилища могут наблюдаться только в теплый период вследствие резкого снижения расхода воды в р. Каме при стабильном уровне воды в Камском водохранилище у г. Березники.

Наблюдаемое содержание хлоридов на водозаборе АО БСЗ и значения уклонов водной поверхности, оцениваемых по разнице уровней воды между постами пгт Тюлькино и г. Березники, рассматривались за 2021–2023 гг.

В период летней межени 2023 г. (рис. 7) на Камском водохранилище отмечались наименьшие расходы воды на основных притоках, в том числе и по р. Каме. Вследствие этого на исследуемом участке фиксировались наибольшие уклоны водной поверхности, что в свою очередь определило условия для формирования вертикальной неоднородности водных масс.



Рис. 7. График изменения содержания хлоридов и уклона водной поверхности на участке от пгт Тюлькино до г. Березники (динамика за 2023 г.)

Fig. 7. Graph of changes in the content of chlorides and the slope of the water surface in the area from the urban-type settlement Tyulkinovo to the city of Berezniki (dynamics for 2023)

Как следует из материалов рис. 7, изменения содержания хлоридов на водозаборе и уклонов водной поверхности на исследуемом участке р. Камы существенно асинхронны. Максимальные концентрации хлоридов наблюдаются при минимальных уклонах. Наиболее существенный интерес представляют резкие повышения содержания хлоридов, наблюдаемые в октябре и ноябре 2023 г. при уклонах водной поверхности значительно выше критических значений. Проведенное численное моделирование показало, что из-за существенного снижения притока воды распределение уклонов водной поверхности очень неоднородно на рассматриваемом участке (рис. 8).

При гидрологических условиях, характерных для данных периодов, как следует из рис. 8, в районе г. Березники уклон водной поверхности должен быть $i \sim 1,5 \cdot 10^{-6}$, что ниже указанных выше критических значений.

На рис. 9 представлено внутрисуточное распределение значений удельной электропроводности за отдельные периоды наблюдений в июне и сентябре 2023 г., когда фиксировались существенные стратификации водных масс. Так, 20 июня менее чем за два часа произошел спад удельной электропроводности с 1900 до 620 мСм/см. Также следует отметить очень резкие изменения значений удельной электропроводности 30 сентября.

Гидрология

Летихин А.П., Любимова Т.П., Богомолов А.В.,

Опунин М.А. Синцова Т.Н.

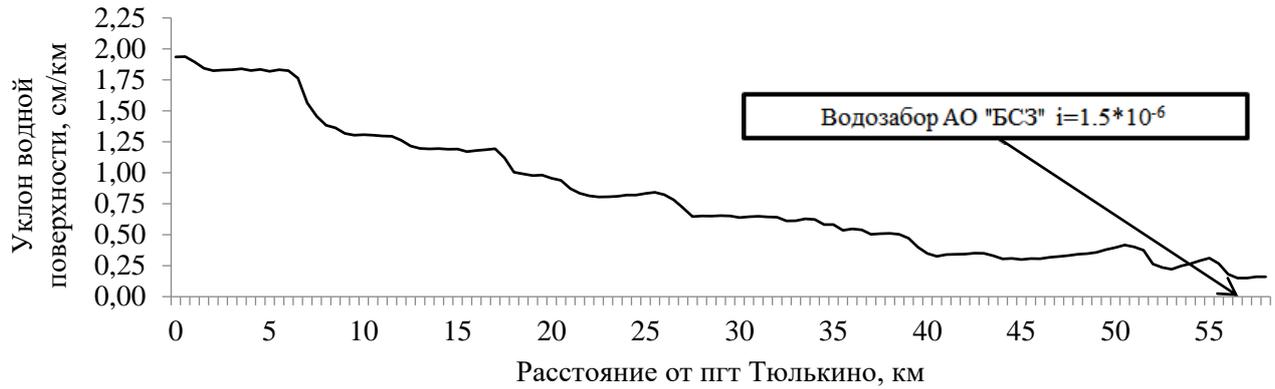


Рис. 8. Распределение уклонов водной поверхности на участке от пгт Тюлькино до г. Березники
 Fig. 8. Distribution of water surface slopes in the area from the urban-type settlement Tyulkiino to the city of Berezniki

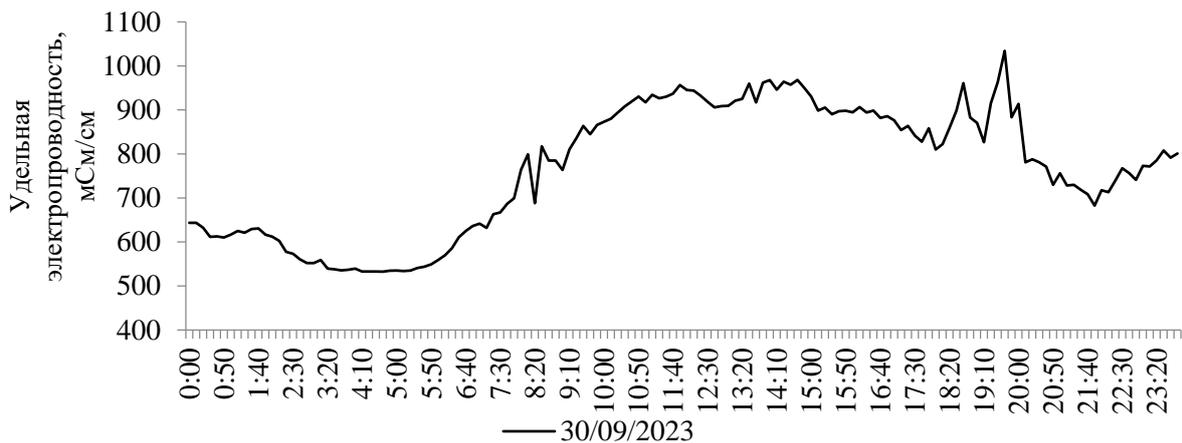
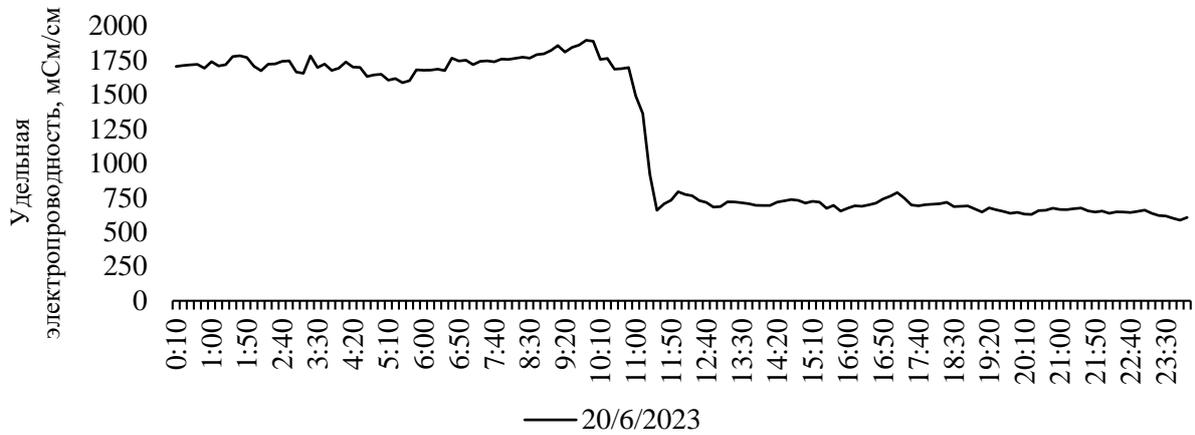


Рис. 9. График внутрисуточного распределения удельной электропроводности (мСм/см)
 Fig. 9. Graph of intraday distribution of specific electrical conductivity (mS/cm)

Отмеченные существенные кратковременные изменения качества воды, косвенным показателем которого является удельная электропроводность, возможны только при значительной вертикальной неоднородности водных масс в условиях наличия отчетливо выраженной границы раздела водных масс.

Гидрология

Лепихин А.П., Любимова Т.П., Богомолов А.В.,

Опутин М.А. Синцова Т.Н.

Заключение

Внутрисуточные колебания качества воды могут оказывать большое влияние как на формирование потребительских свойств воды, так и на экологическую безопасность водных объектов. Поэтому они представляют и практический, и теоретический интерес.

Рассмотрено формирование внутрисуточных колебаний качества воды, наблюдаемых на двух участках Камского водохранилища: первого, непосредственно прилегающего к плотине водохранилища, и второго, расположенного в зоне выклинивания подпора.

Необходимым условием для формирования данных локальных колебаний является наличие вертикальной стратификации водных масс. В первой зоне они формируются вследствие слияния двух рек с существенно различными плотностными характеристиками воды, во второй – вследствие инфильтрации высокоминерализованных рассолов, обусловленной комплексом как естественных природных, так и техногенных факторов.

Вертикальная стратификация водных масс с устойчивой границей раздела формируется при плотностном числе Фруда $F_{r_p} < 1$. При наличии вертикальной стратификации внутрисуточные колебания проявляются в виде внутренних волн, формируемых на границе раздела водных масс. На нижнем участке в районе ЧОС внутренние волны на границе раздела водных масс вызываются резкими колебаниями сброса воды в нижнем бьефе водохранилища, на верхнем колебания обусловлены внутриводоемными процессами, связанными как с регулированием уровня режима водохранилища, так и с колебаниями притока воды к водохранилищу.

Библиографический список

1. 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.
2. Веницианов Е.В., Лепихин А.П. Физико-химические основы моделирования миграции и трансформации тяжелых металлов в природных водах. Екатеринбург: Изд-во РосНИИВХ, 2002. 235 с.
3. Куликов Г.И. Влияние сброса химической промышленности на минерализацию воды Камского водохранилища в районе г. Березники: материалы Всесоюзного совещания по вопросам эксплуатации Камского водохранилища. Пермь, 1959. Вып. 2. С. 1–13.
4. 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.
5. Лепихин А.П., Богомолов А.В., Синцова Т.Н. Особенности внутрисуточных колебаний физических показателей качества воды в Камском водохранилище // Горное эхо. 2023. № 3 (92). С. 14–26.
6. Лепихин А.П., Богомолов А.В., Тиунов А.А. Особенности течений в верхних бьефах крупных ГЭС, связанных с неравномерностью пропуска через них воды // Горное эхо. 2020. № 1 (78). С. 12–15.
7. Лепихин А.П., Веницианов Е.В., Любимова Т.П., Тиунов А.А., Паршакова Я.Н., Ляхин Ю.С., Богомолов А.В. Влияние вертикальной неоднородности водных масс на устойчивость промышленного водоснабжения в зонах высокой техногенной нагрузки // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. 2021. № 4. С. 53–63.
8. 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.
9. Лепихин А.П., Любимова Т.П., Возняк А.А., Паршакова Я.Н., Богомолов А.В., Ляхин Ю.С. Особенности регулирования качества воды при ее селективном заборе из водохранилищ // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2017. № 3. С. 56–68.
10. Лепихин А.П., Любимова Т.П., Паршакова Я.Н., Ляхин Ю.С., Богомолов А.В. Особенности численного моделирования плотностных стратификационных эффектов в динамике крупных водохранилищ // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2016. № 4. С. 32–46.
11. Лепихин А.П., Немковский Б.Б., Онянов В.А., Капитанова Е.Н. Селективный отбор воды // Водоснабжение и санитарная техника. 1988. № 3. С. 27.
12. Любимова Т.П., Лепихин А.П., Богомолов А.В., Паршакова Я.Н. Формирование вертикальной неоднородности водных масс в водохранилищах, расположенных в зонах активного техногенеза // Задачи со свободными границами: теория, эксперимент и приложения: тезисы докладов VIII Всероссийской конференции с международным участием. Томск, 2023. С. 133–134.
13. Любимова Т.П., Лепихин А.П., Паршакова Я.Н., Богомолов А.В., Ляхин Ю.С., Исахов А. Особенности гидродинамики водоемов с вертикальной плотностной неоднородностью водных масс в условиях активного техногенеза // Вычислительная механика сплошных сред. 2023. Т. 16, № 1. С. 115–124.
14. 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.
15. Любимова Т.П., Лепихин А.П., Паршакова Я.Н., Циберкин К.Б. Численное моделирование инфильтрации жидких отходов из хранилища в прилегающие грунтовые воды и поверхностные водоемы // Вычислительная механика сплошных сред. 2015. Т. 8, № 3. С. 310–318.
16. Чалов С.Р., Цыпленков А.С. Роль крупномасштабной турбулентности в изменении мутности речных вод // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2020. № 3. С. 34–46.
17. Elçi S. Effects of thermal stratification and mixing on reservoir water quality // Limnology. 2008. Vol. 9. P. 135–142. doi: 10.1007/s10201-008-0240-x

Гидрология

Лепихин А.П., Любимова Т.П., Богомолов А.В.,
Опутин М.А. Синцова Т.Н.

18. Hamshaw S.D., Dewoolkar M.M., Schroth A.W., Wemple B.C., Rizzo D.M. A New Machine-Learning Approach for Classifying Hysteresis in Suspended-Sediment Discharge Relationships Using High-Frequency Monitoring Data // *Water Resources Research*. 2018. P. 1–19. doi:10.1029/2017WR022238
19. HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual (CPD-69) // Gary W. Brunner, Version 6.2, Exported – December 2022. P. 464.
20. Kenan Alpaslan, Ahmet Sesli, Rıdvan Tepe, Nurten Özbey, Nevin Birici, Tünay Şeker, Mehmet Ali Turan Koçer Vertical and seasonal changes of water quality in Keban dam reservoir // *Journal of FisheriesSciences.com*. 2012. Vol. 6, Issue 3. P. 252–262. doi:10.3153/jfscom.2012029
21. Lepikhin A.P., Voznyak A.A., Lyubimova T.P., Parshakova Y.N., Lyakhin Y.S., Bogomolov A.V. Studying the formation features and the extent of diffuse pollution formed by large industrial complexes: case study of the Solikamsk–Berezniki industrial hub // *Water Resources* / 2020. Vol. 47, No. 5. С. 744–750.
22. Ljahin U.S., Bogomolov A.V., Lepihin A.P. Experience in application of modern technologies of measuring the structure of currents in the upstream waters of large hydroelectric complexes (on the example of the Kama hpp) // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 8. Сер. "VIII All-Russian Scientific-Practical Conference with International Participation "Modern Problems of Reservoirs and Their Catchments". 2021. P. 012005.
23. Lyubimova T., Lepikhin A., Parshakova Ya., Konovalov V., Tiunov A. Formation of the density currents in the zone of confluence of two rivers // *J. Hydrol.* 2014. Vol. 508. P. 328–342. doi: org/10.1016/j.jhydrol.2013.10.041
24. Lyubimova T., Parshakova Y., Lepikhin A., 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. Vol. 13, No. 24.
25. Lyubimova T., Parshakova Y., Lepikhin A., Lyakhin Y., Tiunov A. Application of hydrodynamic modeling in 2D and 3D approaches for the improvement of the recycled water supply systems of large energy complexes based on reservoirs-coolers // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019. Vol. 140. P. 897–908.
26. Lyubimova T.P., Lepikhin A.P., Parshakova Y.N. Influence of hydrodynamic regimes on mixing of waters of confluent rivers // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2021. Vol. 60. P. 1220.
27. Lyubimova T.P., Parshakova Y.N., Lepikhin A.P., Bogomolov A.V. Coherent structures at the interface between water masses of confluent rivers // *Water*. 2022. Vol. 14, No. 8.
28. Lyubimova T.P., Parshakova Y.N., Tsiberkin K.B., Lepikhin A.P. Numerical modeling of liquid-waste infiltration from storage facilities into surrounding groundwater and surface-water bodies // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2016. Vol. 57, No. 7. P. 1208–1216.
29. Richardson David C., Kaplan Louis A., Newbold J. Denis, and Aufdenkampe Anthony K. Temporal dynamics of seston: A recurring nighttime peak and seasonal shifts in composition in a stream ecosystem // *Limnol. Oceanogr.* 2009. No. 54 (1). P. 344–354. doi: 10.4319/lo.2009.54.1.0344
30. Scott C. Brooks, Kenneth A. Lowe, Tonia L. Mehlhorn, Todd A. Olsen, Xiangping Yin, Allison M. Fortner, Mark J. Peterson Intraday Water Quality Patterns in East Fork Poplar Creek with an Emphasis on Mercury and Monomethylmercury // *OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY*. 2018. 69 p. doi: 10.2172/1437608
31. Stott T.A., Grove J.R. Short-term discharge and suspended sediment fluctuations in the proglacial Skeldal River, north-east Greenland // *Hydrological Processes*. 2001. Vol. 15, No. 3. P. 407–423. doi: 10.1002/hyp.156
32. Stott T.A., Mount N.J. Alpine proglacial suspended sediment dynamics in warm and cool ablation seasons: Implications for global warming // *Journal of Hydrology*. 2007. Vol. 332, No. 3–4. P. 259–270. doi: 10.1016/j.jhydrol.2006.07.001
33. Vercruyssen K., Grabowski R.C., Rickson R.J. Suspended sediment transport dynamics in rivers: Multi-scale drivers of temporal variation. *Earth-Science Reviews*. 2017. Vol. 166. P. 38–52. doi: 10.1016/j.earscirev.2016.12.016

References

1. Bogomolov A.V., Lepikhin A.P., Lyakhin YU.S., Grebeneva M.G. Osobennosti kolebaniy vertikal'nykh struktur poley mineralizatsii v Kamskom vodokhranilishche v period letney mezheni v rayone g. Berezniki // *Gornoye ekho*, 2021. № 4 (85). S. 3–11.
2. Venitsianov Ye.V., Lepikhin A.P. Fiziko-khimicheskiye osnovy modelirovaniya migratsii i transformatsii tyazhelykh metallov v prirodnykh vodakh. Yekaterinburg: Izd-vo RosNIIVKH, 2002. 235 s.
3. Kulikov G.I. Vliyaniye sbrosa khimicheskoy promyshlennosti na mineralizatsiyu vody Kamskogo vodokhranilishcha v rayone g. Berezniki // *Materialy Vsesoyuznogo soveshchaniya po voprosam ekspluatatsii Kamskogo vodokhranilishcha*. Perm', 1959. Vyp. 2. S. 1–13.
4. Lepikhin A.P., Bogomolov A.V., Lyakhin YU.S. K osobennosti formirovaniya kachestva vody r. Kamy (Kamskogo vodokhranilishcha) v zimniy period v rayone g. Berezniki // *Gornoye ekho*, 2022. № 1 (86). S. 13–25.
5. Lepikhin A.P., Bogomolov A.V., Sintsova T.N. Osobennosti vnutrisutochnykh kolebaniy fizicheskikh pokazateley kachestva vody v Kamskom vodokhranilishche // *Gornoye ekho*, 2023. № 3 (92). S. 14–26.
6. Lepikhin A.P., Bogomolov A.V., Tiunov A.A. Osobennosti techeniy v verkhnikh b'yefakh krupnykh GES, svyazannykh s neravnovernost'yu propuska cherez nikh vody // *Gornoye ekho*, 2020. № 1 (78). S. 12–15.
7. Lepikhin A.P., Venitsianov Ye.V., Lyubimova T.P., Tiunov A.A., Parshakova YA.N., Lyakhin YU.S., Bogomolov A.V. Vliyaniye vertikal'noy neodnorodnosti vodnykh mass na ustoychivost' promyshlennogo vodosnabzheniya v zonakh vysokoy tekhnogennoy nagruzki // *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2021. № 4. S. 53–63.
8. Lepikhin A.P., Voznyak A.A., Lyubimova T.P., Parshakova YA.N., Lyakhin YU.S., Bogomolov A.V. Issledovaniye osobennostey formirovaniya i masshtabov diffuznogo zagryazneniya, sformirovannogo krupnymi promyshlennymi kompleksami, na primere Solikamsko-Bereznikovskogo promuzla // *Vodnyye resursy*, 2020. T. 47. № 5. S. 560–566.
9. Lepikhin A.P., Lyubimova T.P., Voznyak A.A., Parshakova YA.N., Bogomolov A.V., Lyakhin YU.S. Osobennosti regulirovaniya kachestva vody pri yeye selektivnom zabore iz vodokhranilishch // *Vodnoye khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravleniye*, 2017. № 3. S. 56–68.

Гидрология

Лепихин А.П., Любимова Т.П., Богомолов А.В.,

Опутин М.А. Синцова Т.Н.

10. Lepikhin A.P., Lyubimova T.P., Parshakova YA.N., Lyakhin YU.S., Bogomolov A.V. Osobennosti chislennogo modelirovaniya plotnostnykh stratifikatsionnykh effektov v dinamike krupnykh vodokhranilishch // Vodnoye khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravleniye, 2016. № 4. S. 32-46.
11. Lepikhin A.P., Nemkovskiy B.B., Onyanov V.A., Kapitanova Ye.N. Selektivnyy otbor vody // Vodosnabzheniye i sanitarnaya tekhnika, 1988. № 3. S. 27.
12. Lyubimova T.P., Lepikhin A.P., Bogomolov A.V., Parshakova YA.N. Formirovaniye vertikal'noy neodnorodnosti vodnykh mass v vodokhranilishchakh, raspolozhennykh v zonakh aktivnogo tekhnogeneza // V knige: Zadachi so svobodnymi granitsami: teoriya, eksperiment i prilozheniya. Tezisy dokladov VIII Vserossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem. Tomsk, 2023. S. 133-134.
13. Lyubimova T.P., Lepikhin A.P., Parshakova YA.N., Bogomolov A.V., Lyakhin YU.S., Isakhov A. Osobennosti gidrodinamiki vodoyemov s vertikal'noy plotnostnoy neodnorodnost'yu vodnykh mass v usloviyakh aktivnogo tekhnogeneza // Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred, 2023. T. 16. № 1. S. 115-124.
14. Lyubimova T.P., Lepikhin A.P., Parshakova YA.N., Bogomolov A.V., Lyakhin YU.S. Vliyanie na kachestvo otbirayemoy vody nestatsionarnosti skorostnogo rezhima vodnogo ob'yekta pri nalichii v nem plotnostnoy stratifikatsii // Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred, 2022. T. 15. № 2. S. 133-144.
15. Lyubimova T.P., Lepikhin A.P., Parshakova YA.N., Tsiberkin K.B. Chislennoye modelirovaniye infil'tratsii zhidkikh otkhodov iz khranilishcha v prilgayushchiye gruntovyye vody i poverkhnostnyye vodoyemy // Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred, 2015. T. 8. № 3. S. 310-318.
16. Chalov S.R., Tsyplenkov A.S. Rol' krupnomasshtabnoy turbulentsii v izmenenii mutnosti rechnykh vod // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya, 2020. №3. S. 34-46.
17. Elçi, S. Effects of thermal stratification and mixing on reservoir water quality // Limnology, 2008. 9: 135-142. DOI: 10.1007/s10201-008-0240-x
18. Hamshaw S.D., Dewoolkar M.M., Schroth A.W., Wemple B.C., Rizzo D.M. A New Machine-Learning Approach for Classifying Hysteresis in Suspended-Sediment Discharge Relationships Using High-Frequency Monitoring Data // Water Resources Research, 2018. P. 1-19. DOI:10.1029/2017WR022238
19. HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual (CPD-69) // Gary W. Brunner, Version 6.2, Exported – December 2022. P. 464.
20. Kenan Alpaslan, Ahmet Sesli, Rıdvan Tepe, Nurten Özbey, Nevin Birici, Tünay Şeker, Mehmet Ali Turan Koçer Vertical and seasonal changes of water quality in Keban dam reservoir // Journal of FisheriesSciences.com, 2012. Volume 6. Issue 3. P. 252-262. DOI:10.3153/jfsc.com.2012029
21. Lepikhin A.P., Voznyak A.A., Lyubimova T.P., Parshakova Y.N., Lyakhin Y.S., Bogomolov A.V. Studying the formation features and the extent of diffuse pollution formed by large industrial complexes: case study of the Solikamsk–Berezniki industrial hub // Water Resources, 2020. T. 47. № 5. C. 744-750.
22. Ljahin U.S., Bogomolov A.V., Lepihin A.P. Experience in application of modern technologies of measuring the structure of currents in the upstream waters of large hydroelectric complexes (on the example of the Kama hpp) // В сборнике: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 8. Сер. "VIII All-Russian Scientific-Practical Conference with International Participation "Modern Problems of Reservoirs and Their Catchments"", 2021. P. 012005.
23. Lyubimova T., Lepikhin A., Parshakova Ya., Konovalov V., Tiunov A. Formation of the density currents in the zone of confluence of two rivers // J. Hydrol, 2014. V. 508. P. 328-342. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.10.041>
24. Lyubimova T., Parshakova Y., Lepikhin A., 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. T. 13. № 24.
25. Lyubimova T., Parshakova Y., Lepikhin A., Lyakhin Y., Tiunov A. Application of hydrodynamic modeling in 2D and 3D approaches for the improvement of the recycled water supply systems of large energy complexes based on reservoirs-coolers // International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019. T. 140. C. 897-908.
26. Lyubimova T.P., Lepikhin A.P., Parshakova Y.N. Influence of hydrodynamic regimes on mixing of waters of confluent rivers // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 2021. T. 60. P. 1220.
27. Lyubimova T.P., Parshakova Y.N., Lepikhin A.P., Bogomolov A.V. Coherent structures at the interface between water masses of confluent rivers // Water, 2022. T. 14. № 8.
28. Lyubimova T.P., Parshakova Y.N., Tsiberkin K.B., Lepikhin A.P. Numerical modeling of liquid-waste infiltration from storage facilities into surrounding groundwater and surface-water bodies // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 2016. T. 57. № 7. P. 1208-1216.
29. Richardson David C., Kaplan Louis A., Newbold J. Denis, and Aufdenkampe Anthony K. Temporal dynamics of seston: A recurring nighttime peak and seasonal shifts in composition in a stream ecosystem // Limnol. Oceanogr., 2009. 54(1). P. 344–354. DOI:10.4319/lo.2009.54.1.0344
30. Scott C. Brooks, Kenneth A. Lowe, Tonia L. Mehlhorn, Todd A. Olsen, Xiangping Yin, Allison M. Fortner, Mark J. Peterson Intraday Water Quality Patterns in East Fork Poplar Creek with an Emphasis on Mercury and Monomethylmercury // OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, 2018. 69 p. DOI: 10.2172/1437608
31. Stott T.A., Grove J.R. Short-term discharge and suspended sediment fluctuations in the proglacial Skeldal River, north-east Greenland // Hydrological Processes, 2001. Vol. 15. No. 3. P. 407-423. DOI:10.1002/hyp.156
32. Stott T.A., Mount N.J. Alpine proglacial suspended sediment dynamics in warm and cool ablation seasons: Implications for global warming // Journal of Hydrology, 2007. Vol. 332. No. 3–4. P. 259–270. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2006.07.001
33. Vercruyssen K., Grabowski R.C., Rickson R.J. Suspended sediment transport dynamics in rivers: Multi-scale drivers of temporal variation. Earth-Science Reviews, 2017. Vol. 166. P. 38-52. DOI: 10.1016/j.earscirev.2016.12.016

Статья поступила в редакцию: 04.04.2024, одобрена после рецензирования: 03.07.2024, принята к опубликованию: 12.09.2024.
The article was submitted: 4 April 2024; approved after review: 3 July 2024; accepted for publication: 12 September 2024.

Гидрология

Лепихин А.П., Любимова Т.П., Богомолов А.В.,
Опутин М.А. Синцова Т.Н.

Информация об авторах

Анатолий Павлович Лепихин

доктор географических наук, профессор,
главный научный сотрудник, Российский научно-
исследовательский институт комплексного
использования и охраны водных ресурсов,
Камский филиал;
614002, Россия, Пермь, ул. Николая Островского, 113;

заведующий лабораторией проблем гидрологии
суши, Горный институт УрО РАН, Россия;

614007, Россия, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А

e-mail: lepikhin49@mail.ru

Татьяна Петровна Любимова

доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий лабораторией вычислительной
гидродинамики,

Институт механики сплошных сред УрО РАН;

614013, Россия, Пермь, ул. Ак. Королева, 1

e-mail: lyubimovat@mail.ru

Андрей Владимирович Богомолов

кандидат технических наук, старший научный
сотрудник лаборатории проблем гидрологии суши,
Горный институт УрО РАН;

614007, Россия, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А

e-mail: whitewing85@mail.ru

Максим Андреевич Опутин

инженер лаборатории проблем гидрологии суши,
Горный институт УрО РАН;

614007, Россия, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А

e-mail: maksimopotka@yandex.ru

Татьяна Николаевна Синцова

ведущий инженер лаборатории проблем
гидрологии суши,

Горный институт УрО РАН;

614007, Россия, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А

e-mail: tanya_sinzova@mail.ru

Information about the authors

Anatoly P. Lepikhin

Doctor of Geographical Sciences, Professor,
Chief Researcher, Russian Research Institute for the
Integrated Use and Protection of Water Resources,
Kama Branch;

113, Nikolaya Ostrovskogo st., Perm, 614002, Russia;

Head of the Laboratory of Land Hydrology Problems,
Mining Institute of the Ural Branch of the Russian
Academy of Sciences;

78A, Sibirskaya st., Perm, 614007, Russia

e-mail: lepikhin49@mail.ru

Tatyana P. Lyubimova

Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
Professor, Head of the Laboratory of Computational
Fluid Dynamics, Institute of Continuum Mechanics of
the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences;

1, Akademika Korolev st., Perm, 614013, Russia

Andrey V. Bogomolov

Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher,
Laboratory of Land Hydrology Problems, Mining Institute
of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences;

78A, Sibirskaya st., Perm, 614007, Russia

Maksim A. Oputin

Engineer, Laboratory of Land Hydrology Problems,
Mining Institute of the Ural Branch of the Russian
Academy of Sciences;

78A, Sibirskaya st., Perm, 614007, Russia

Tatyana N. Sintsova

Leading Engineer, Laboratory of Land Hydrology
Problems, Mining Institute of the Ural Branch of the
Russian Academy of Sciences;

78A, Sibirskaya st., Perm, 614007, Russia

Вклад авторов

Лепихин Анатолий Павлович – идея исследования, идея статьи, обработка и анализ полевых данных, написание статьи, редактирование статьи.

Любимова Татьяна Петровна – написание статьи, редактирование статьи.

Богомолов Андрей Владимирович – обработка и анализ полевых данных, написание статьи, редактирование статьи.

Опутин Максим Андреевич – обработка и анализ полевых данных, написание статьи, редактирование статьи.

Синцова Татьяна Николаевна – обработка и анализ полевых данных, написание статьи, редактирование статьи.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors

Anatoly P. Lepikhin – the idea of the study, the idea of the article; field data processing and analysis; writing and editing of the article.

Tatyana P. Lyubimova – writing and editing of the article.

Andrey V. Bogomolov – field data processing and analysis; writing and editing of the article.

Maksim A. Oputin – field data processing and analysis; writing and editing of the article.

Tatyana N. Sintsova – field data processing and analysis; writing and editing of the article.

The authors declare no conflict of interest.