

УДК 556.555.7

DOI 10.17513/use.38300

## ВНУТРИСУТОЧНЫЕ КОЛЕБАНИЯ КАЧЕСТВА ВОДЫ КАМСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Синцова Т.Н., Опутин М.А.

*Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, Пермь,  
e-mail: tanya\_sinzova@mail.ru*

Цель исследования – оценка колебаний изменчивости показателей качества воды и ее химического состава, имеющая принципиальное значение для решения широкого круга задач, связанных с охраной природы и ее рациональным использованием. 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 исследованным явлением, 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 участке Камского водохранилища, непосредственно прилегающем к Камской ГЭС. На данном участке качество забираемой воды в зимний период характеризуется ярко выраженными межсуточными и внутрисуточными колебаниями, обусловливаемыми значительными изменениями расходов сброса воды в нижнем бьефе.

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

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания (рег. номер НИОКТР: 124020500053-6).*

## INTRADAY FLUCTUATIONS IN THE WATER QUALITY ON THE KAMSKY RESERVOIR

Sintsova T.N., Oputin M.A.

*Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm,  
e-mail: tanya\_sinzova@mail.ru*

The aim of the study is to assess the fluctuations in the variability of their chemical composition indicators, which is of fundamental importance for solving a wide range of problems related to their protection and rational use. In this case, as a rule, seasonal and monthly fluctuations are considered and analyzed. This was due, first 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. First of all, 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 discusses the processes recorded in the section of the Kama Reservoir, directly adjacent to the Kama Hydroelectric Power Station. In this area, the quality of withdrawn water in winter is characterized by pronounced inter- and intraday fluctuations, caused by significant changes in water discharge rates in the downstream.

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

*The study was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state task (registration number R&D: 124020500053-6).*

### Введение

Колебания качества воды в водохранилищах представляют значительный как практический, так и теоретический интерес. При этом традиционно основное внимание уделяется сезонным, а также междугодовым колебаниям [1]. Однако в последние годы в связи с совершенствованием систем наблюдений значительное внимание стало уделяться более короткопериодным, в том числе и внутрисуточным, колебаниям [2-4].

Внутрисуточные колебания играют принципиально важную роль в обеспечении устойчивости функционирования систем как питьевого, так и промышленного водопользования [5, 6]. 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 невозмож-

ным их исследование с использованием традиционных схем оценки измеряемых поллютантов в воде, с применением 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 его очень удобно определять в автоматическом режиме.

Естественно, для практического применения необходимы построение и оценка соответствующих регрессионных зависимостей между содержанием лимитирующего показателя качества воды и удельной электропроводностью. Как правило, эти зависимости при условии температурной компенсации характеризуются высокой надежностью.

Погрешность данного соотношения определяется, в первую очередь, стабильностью их относительных концентраций в формировании суммарной минерализации воды. Существенный интерес представляет оценка возможной погрешности. Так как метрологическая погрешность измерения удельной электропроводности воды весьма мала и ее относительная величина составляет  $\sigma \sim 0,01$ , то основные неопределенности формируются непостоянным параметром изменчивости  $P_i = C_i / M$ , где  $C_i$  – содержание  $i$ -ингредиента;  $M$  – минерализация воды. В общем случае при достаточно полном учете всех значимых макрокомпонентов имеем

$$\sum_{i=1}^N P_i = 0,$$

где  $N$  – общее количество рассматриваемых ингредиентов.

В этом случае средняя квадратическая погрешность соотношения должна составлять:

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^N \left( C v_{P_i}^2 \cdot \sum_{j=1}^N (1 - R_{ij}^2) \right).$$

Нетрудно видеть, что соотношение (1) будет минимально, если при  $\max P_i C v_{P_i} \rightarrow 0$ , а  $R_{ij} \rightarrow 1$ .

Однако высокая связность между величиной удельной электропроводности и со-

держанием конкретного ингредиента является подтверждением высокой устойчивости, стабильности химического состава  $C v_{ji} \rightarrow 0$ .

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 данные 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.

**Цель исследования** состоит в анализе особенностей формирования внутрисуточных колебаний показателей качества воды, наблюдаемых в Камском водохранилище.

#### Материал и методы исследования

Основной водозабор питьевой воды г. Перми – ЧОС – расположен непосредственно ниже зоны слияния рек Сылва и Чусовая, находящихся в подпоре от плотины Камской ГЭС (рис. 1). В ранее проведенных исследованиях была выявлена [7-9] характерная особенность данного района водохранилища – водные массы в зимний период характеризуются значительной вертикальной неоднородностью. В придонных горизонтах транспортируются более плотные воды, характеризующиеся повышенной жесткостью воды р. Сылва, достигающей 13–14 единиц, а в приповерхностных горизонтах – менее плотные воды р. Чусовой с меньшей жесткостью воды [10].

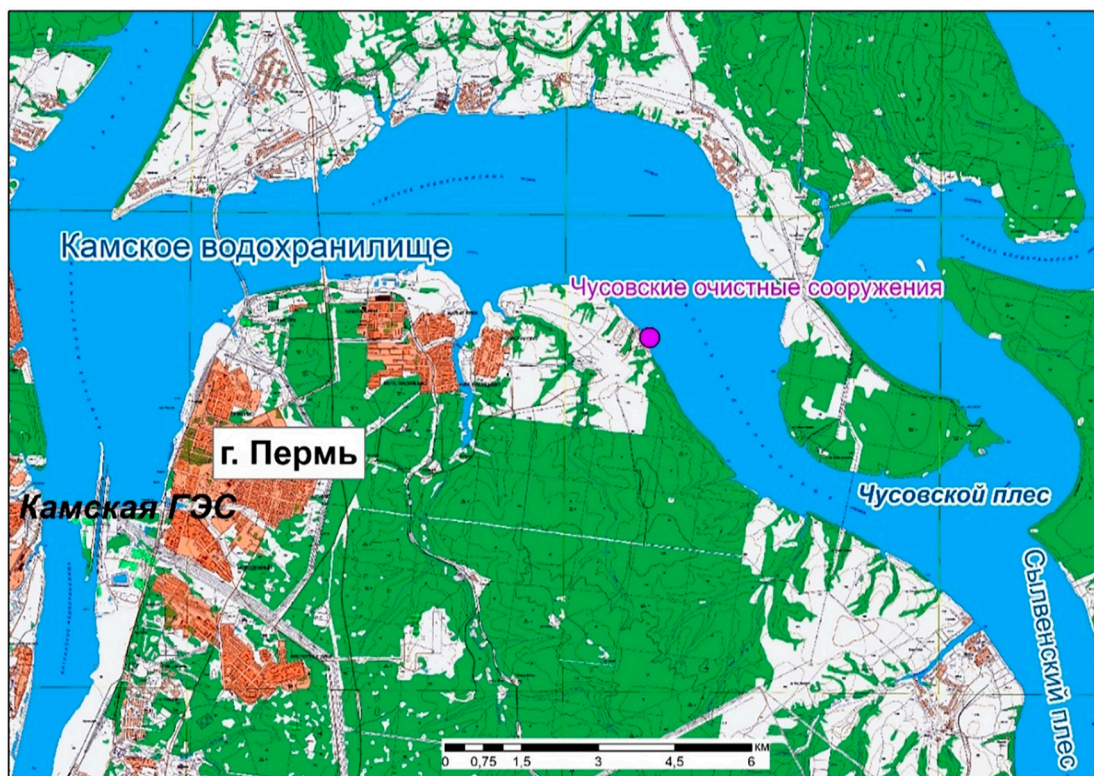


Рис. 1. Исследуемый участок реки Камы (Камского водохранилища)

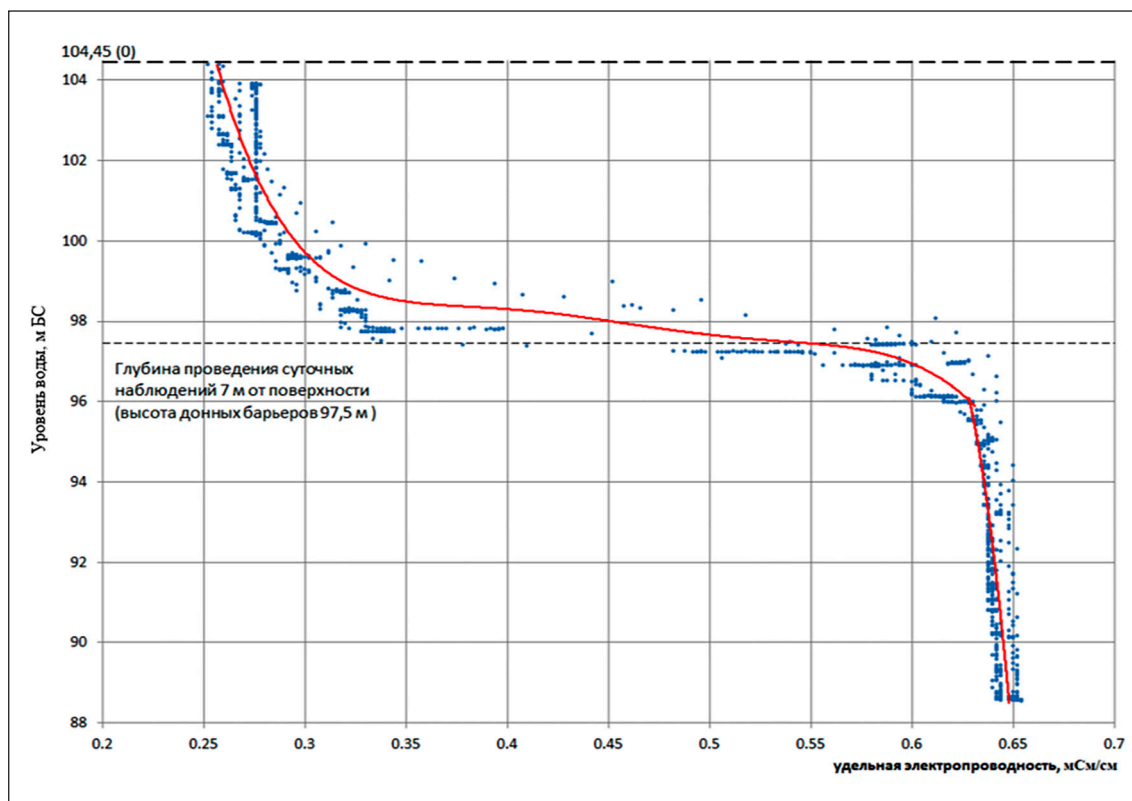


Рис. 2. Изменение по глубине удельной электропроводности воды в районе ЧОС (28 января 2021 г.)

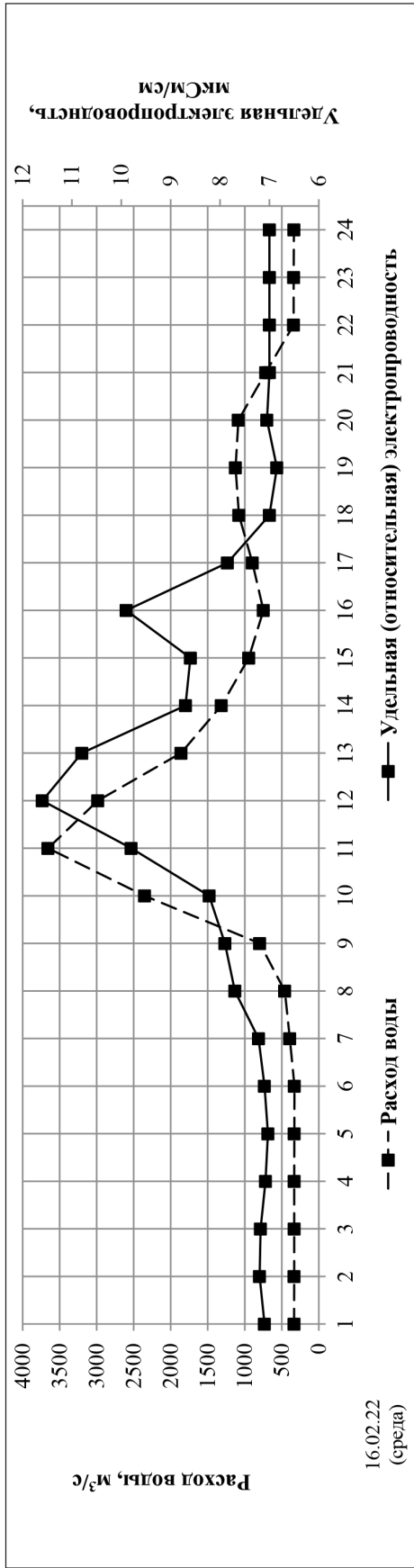


Рис. 3. График внутрисуточных колебаний характерных значений расходов воды и удельной электропроводности

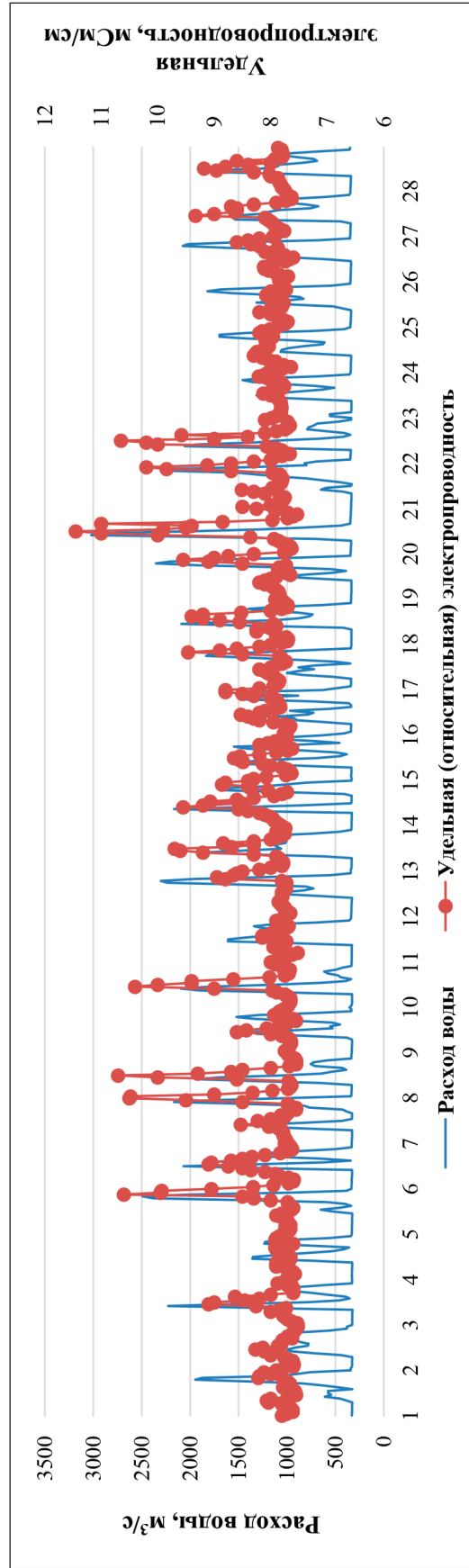


Рис. 4. Синхронный график изменений расхода воды и удельной электропроводности (февраль 2022 г.)



Высокая закарстованность водосборной территории р. Сылвы обуславливает не только повышенную жесткость ее воды, но и 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 [8, 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 примерно 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) [10].

Жесткость воды является лимитирующим показателем на рассматриваемом водозаборе ЧОС, поскольку водные массы, приходящие по р. Сылва, высокоминерализованы из-за закарстованности речного бассейна. Однако [10] общая минерализация воды,

как и жесткость, являясь химическим показателем, требует для своего определения достаточно сложной процедуры. Поэтому при проведении полевых исследований значительно удобнее использовать непосредственно измеряемый показатель – удельную электропроводность воды. Основным преимуществом применения данного показателя является, как уже отмечалось, удобство его определения при наличии очень хорошей линейной связи его с минерализацией [10] и жесткостью воды.

### Результаты исследования и их обсуждение

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. Представленные рисунки 3, 4 наглядно демонстрируют особенности регулирования характерных значений расходов воды и удельной электропроводности через гидроузел Камской ГЭС.

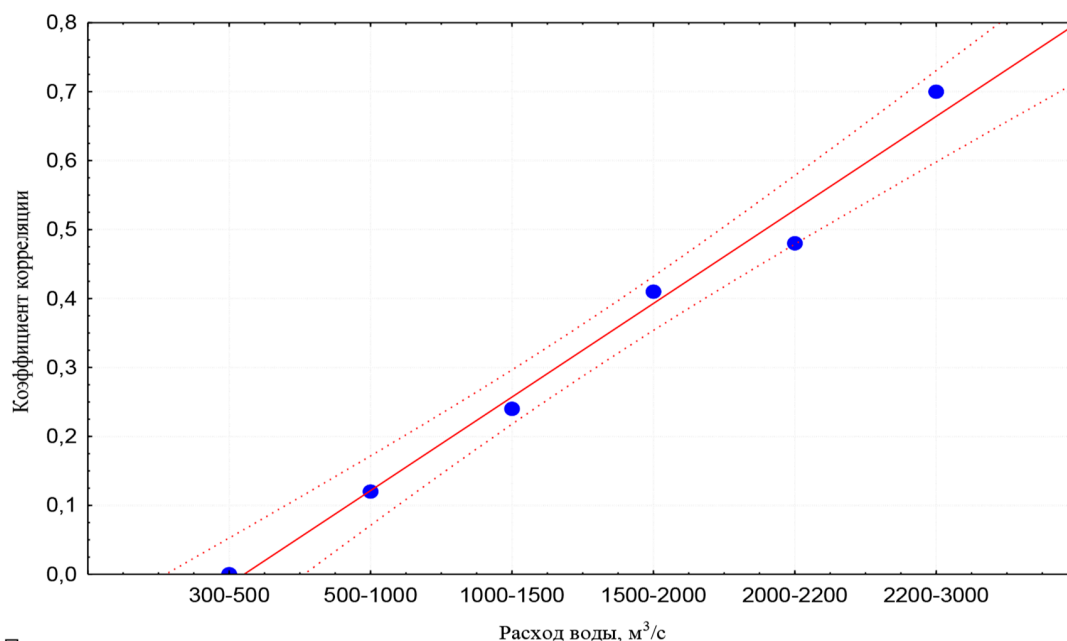


Рис. 5. Зависимость между коэффициентом корреляции (расход воды – удельная электропроводность) от диапазона рассматриваемых расходов воды

В то же время принципиальное влияние на качество забираемой воды оказывают значительные сбросы воды в нижний бьеф гидроузла Камской ГЭС. При малых сбросах воды влияние практически отсутствует.

На рисунке 5 представлена зависимость коэффициентов корреляции Пирсона между удельной электропроводностью воды и расходами сбросов. Как следует из рисунка 5, при колебаниях сбросов воды ниже 1500–2000 м<sup>3</sup>/с данная связь статически слабая, в то же время при расходах более 2020 м<sup>3</sup>/с она становится весьма существенной.

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

### Заключение

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

Необходимым условием для формирования данных локальных колебаний является наличие вертикальной стратификации водных масс, формирующихся вследствие слияния двух рек с существенно различными плотностными характеристиками воды.

Вертикальная стратификация водных масс с устойчивой границей раздела формируется при плотностном числе Фруда  $Fr_p < 1$ . 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 вызы-

ваются резкими колебаниями сброса воды в нижнем бьефе водохранилища, на верхнем участке колебания обусловлены внутриводоемными процессами, связанными как с регулированием уровня режима водохранилища, так и с колебаниями притока воды к водохранилищу.

### Список литературы

1. Bor Ashi, Elçi Şebnem Impacts of construction of dam on the flow regimes and water quality: A case study from Turkey // *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2022. Vol. 19. P. 4069–4086.–4086, (2022)
2. Розенталь О.М., Синцова Т.Н. Динамика физических показателей качества воды (на примере исследования р. Усури) // *Экологические системы и приборы*. 2024. № 3. С. 3–13. DOI: 10.25791/esip.3.2024.1434.
3. 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.
4. Чалов С.Р., Цыпленков А.С. Роль крупномасштабной турбулентности в изменении мутности речных вод // *Вестник Московского университета*. 2020. № 3. С. 34–46.
5. Чалов С.Р., Морейдо В.М., Денисова И.С., Солоников И.А. Высокочастотный мониторинг и модели машинного обучения для оценки синоптической изменчивости стока взвешенных наносов малой городской реки // *Гидросфера. Опасные процессы и явления*. 2023. Т. 5, № 1. С. 59–74.
6. Розенталь О.М., Тамбиева Дж.А. Волновая динамика качества речной воды // *Доклады Российской Академии Наук. Науки о Земле*. 2020. Т. 491, № 1. С. 82–86.
7. 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.
8. 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 КарНЦ РАН*. 2021. № 4. С. 53–63. DOI: 10.17076/lim1419.
9. Lyubimova T., Lepikhin A., Parshakova Ya., Kononov 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: 10.1016/j.jhydrol.2013.10.041.
10. 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.
11. Лепихин А.П., Немковский Б.Б., Онянов В.А., Капитанова Е.Н. Селективный отбор воды // *Водоснабжение и санитарная техника*. 1988. № 3. С. 27–28.