

ГОРНОПРОМЫШЛЕННАЯ ГЕОЛОГИЯ, ГИДРОЛОГИЯ И ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 556.5

DOI:10.7242/echo.2021.4.1

ОСОБЕННОСТИ КОЛЕБАНИЙ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТРУКТУР ПОЛЕЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ В КАМСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ В ПЕРИОД ЛЕТНЕЙ МЕЖЕНИ В РАЙОНЕ г. БЕРЕЗНИКИ

А.В. Богомолов¹, А.П. Лепихин¹, Ю.С. Ляхин¹, М.Г. Гребенева²

¹ Горный институт УрО РАН, г. Пермь

² Акционерное общество «Березниковский содовый завод»

Аннотация: Показано, что в период летней межени в Камском водохранилище в районе г. Березники формируются зоны существенной вертикальной неоднородности водных масс, оказывающие существенное влияние на устойчивость систем технического водоснабжения. Для исследования данного явления были проведены детальные ежемесячные гидрохимические съемки данного участка водохранилища, а так же учащенный (1 раз/сут.) анализ качества забираемой воды на техническом водозаборе. Дан анализ возможных причин формирования данного явления.

Ключевые слова: Водохранилище, вертикальная стратификация водных масс, устойчивость водоснабжения.

Введение. Водоснабжение промышленных предприятий Соликамско-Березниковского промузла в значительной мере осуществляется из поверхностных водных объектов, в первую очередь из р. Камы (Камское водохранилище). Современное технологичное оборудование часто предъявляет достаточно жесткие требования к качеству воды. Так, если ПДК по хлоридам для водных объектов, используемых в хозяйственно-бытовых и питьевых целях, составляет 350 мг/л [1], рыбохозяйственных – 300 мг/л [2], то технологические нормативы для целого ряда производственных циклов составляют 100 мг/л. При этом нарушение качества забираемой воды может приводить к остановке производственных процессов и значительным финансовым потерям. В связи с этим в последние годы стал возрастать интерес к формированию гидрохимического режима водных объектов, расположенных в зонах активного техногенеза.

Характерной особенностью гидрохимического режима р. Камы (Камское водохранилище) в районе г. Березники является наблюдаемая в теплый период значительная вертикальная неоднородность водных масс. Впервые этот эффект был обнаружен Г.И. Куликовым при проведении первой детальной съемки Камского водохранилища после его наполнения. Эти материалы были опубликованы в 1959 г. [3]. Так как данное явление наблюдалось не по всей акватории и не в течение всего теплого периода, на него до последнего времени не обращалось должного внимания, хотя при проведении детальной гидрохимической съемки оно неоднократно фиксировалось независимыми исследователями [4]. Это было связано в первую очередь с тем, что это явление не укладывалось в рамки традиционных представлений о формировании гидрохимического режима водохранилищ, с трудоемкостью проведения таких исследований, а так же с необходимостью использования специальных средств отбора проб воды и измерений. Так, при государственном мониторинге р. Камы, проводимом региональным подразделением Росгидромета, отбор проб воды осуществляется только с одного горизонта – поверхностного.

Следует отметить, что при анализе причин ухудшения условий технического водоснабжения из Верхне-Зырянского водохранилища также была обнаружена существенная вертикальная стратификация водных масс [5].

Материалы и методы

Ситуация с вниманием к обозначенной выше проблеме принципиально изменилась после аварии в июле 2021 г. [6], в результате которой на несколько дней было остановлено промышленное водоснабжение крупного комплекса.

В связи с этим была разработана специальная программа исследований, включающая в себя регулярные наблюдения как непосредственно в акватории водохранилища, так и на отдельных технических водозаборах. Так как основным лимитирующим ингредиентом, определяющим качество воды на рассматриваемом участке Камского водохранилища является хлорид-ион, на водозаборах контролируется данный показатель. В то же время удельная электропроводность воды очень тесно связана с общей минерализацией воды, определяемой в первую очередь содержанием в ней хлоридов. Оценка изменения величины общей минерализации воды как по акватории рассматриваемого участка водохранилища, так и по глубине, проводилась с использованием данного показателя. В настоящее время имеется целая линейка сертифицированных приборов, позволяющих оперативно и с большой надежностью проводить измерения удельной электропроводности воды с учетом ряда «мешающих» факторов, в том числе и температуры воды. Исследования проводились на участке Камского водохранилища от устья р. Северная Ленва до впадения транспортного канала. Общая протяженность участка составила около 7 км. Распределение на нем промерных вертикалей показано на рисунке 1.

В теплый период измерения удельной электропроводности и отбор проб воды на вертикалях проводились ежемесячно. Интервал измерений по глубине принимался в 1 м при незначительных вертикальных градиентах с уменьшением его до 0,5 м в зонах значительной вертикальной неоднородности.

Некоторые метеорологические и гидрологические характеристики, наблюдаемые при выполнении полевых работ, представлены в таблице 1.

Как показали выполненные измерения, в период прохождения волны весеннего половодья (13.05.21, расход воды – 5708 м³/сек) наблюдаемые значения удельной электропроводности были минимальны и имели равномерное распределение по глубине водохранилища. Данный результат объясняется высокой долей в формировании весеннего половодья слабоминерализованного поверхностного стока, а также значительной интенсивностью вертикального перемешивания водных масс. В период летне-осенней межени при прохождении значительно меньших расходов воды ($Q \sim 350-650$ м³/сек) ситуация иная. Если на верхних «фоновых» вертикалях, расположенных в районе автодорожного моста, также наблюдается однородность водных масс по глубине (рисунок 2), то на вертикалях, прилегающих к основному выпуску сточных вод г. Березники (ООО «СТОК»), фиксируется наличие значительной вертикальной неоднородности, что объясняется низкой эффективностью рассеивания действующего водовыпуска (рисунок 3).

В то же время наличие устойчивой стратификации на вертикалях, расположенных на значительном расстоянии от данного водовыпуска, требует дополнительного специального исследования. В работе [7] была показана существенная роль фильтрационных разгрузок в формировании загрязнения водных масс Камского водохранилища. Фильтрационные разгрузки высокоминерали-

зованных рассолов при их поступлении в Камское водохранилище могут создавать в придонной области локальные зоны повышенной минерализации. В водном объекте формируется устойчивая плотностная стратификация [8], если плотностное число

$$Fr^2 = \frac{V^2}{\frac{\Delta\rho}{\rho} * g * H},$$

где $\frac{\Delta\rho}{\rho}$ – относительное различие плотностей рассматриваемых водных масс, g – ускорение сводного падения, V – характерная скорость течения, H – характерная глубина. При этом необходимо учитывать, что области малых значений плотности воды линейно связаны с минерализацией.

Характерной особенностью рассматриваемого участка Камского водохранилища является то, что он расположен в зоне переменного подпора от Камской ГЭС, соответственно, его гидродинамический режим определяется не только расходами р. Кама, но и режимом работы Камской ГЭС.

Ближайший гидрометрический пост, на котором проводятся регулярные гидрометрические наблюдения за расходами воды, расположен в 70 км выше рассматриваемого участка – в п. Тюлькино. Непосредственно на гидрологическом посту Березники проводятся регулярные измерения уровней воды. При этом необходимо отметить, что в период летней межени с середины июня до начала сентября расходы воды изменялись в достаточно узком диапазоне $350 \leq Q \leq 500$ м³/сек (рисунок 4).

В связи с этим принципиальный интерес представляет существенное изменение вертикальной структуры полей удельной электропроводности, а, соответственно, и общей минерализации воды на вертикалях, расположенных значимо выше по течению от выпуска сточных вод ООО «Сток». В качестве характерной можно рассмотреть вертикаль № 146, расположенную в ~ 2,3 км выше выпуска сточных вод ООО «Сток»), в непосредственной близости от водозабора АО «БСЗ». Как следует из рисунка 5, в отдельные периоды, а именно 20.07.21 и 31.08.21, наблюдалась существенная стратификация водных масс в районе данной вертикали. В тоже время 18.06.21, 10.08.21 и 13.09.21, когда расходы воды были в ~1,5-2 раза больше, данной вертикальной неоднородности водных масс не наблюдалось (таблица 1).

Существенная перестройка вертикальной структуры водных масс с формированием зон повышенной минерализации в придонной области наглядно отражается в материалах контроля качества забираемой воды на водозаборе АО «БСЗ», проводимого с частотой отбора проб воды 4 раза в сутки (рисунок 6). Так, на данном водозаборе отбор воды осуществлялся с придонного горизонта. В периоды, когда наблюдалась вертикальная стратификация водных масс, содержание хлоридов в забираемой воде значительно увеличивалось (рисунок 6).

Так как колебания уровней воды р. Камы (Камское водохранилище) могут достигать в годовом разрезе ~ 6-7 м, для обеспечения устойчивого водоснабжения многие промышленные водозаборы имеют глубинное расположение окон.

В этих условиях наблюдаемая в летне-осеннюю межень значительная вертикальная неоднородность водных масс очень серьезно влияет на устойчивость работы всей системы технического водоснабжения г. Березников.

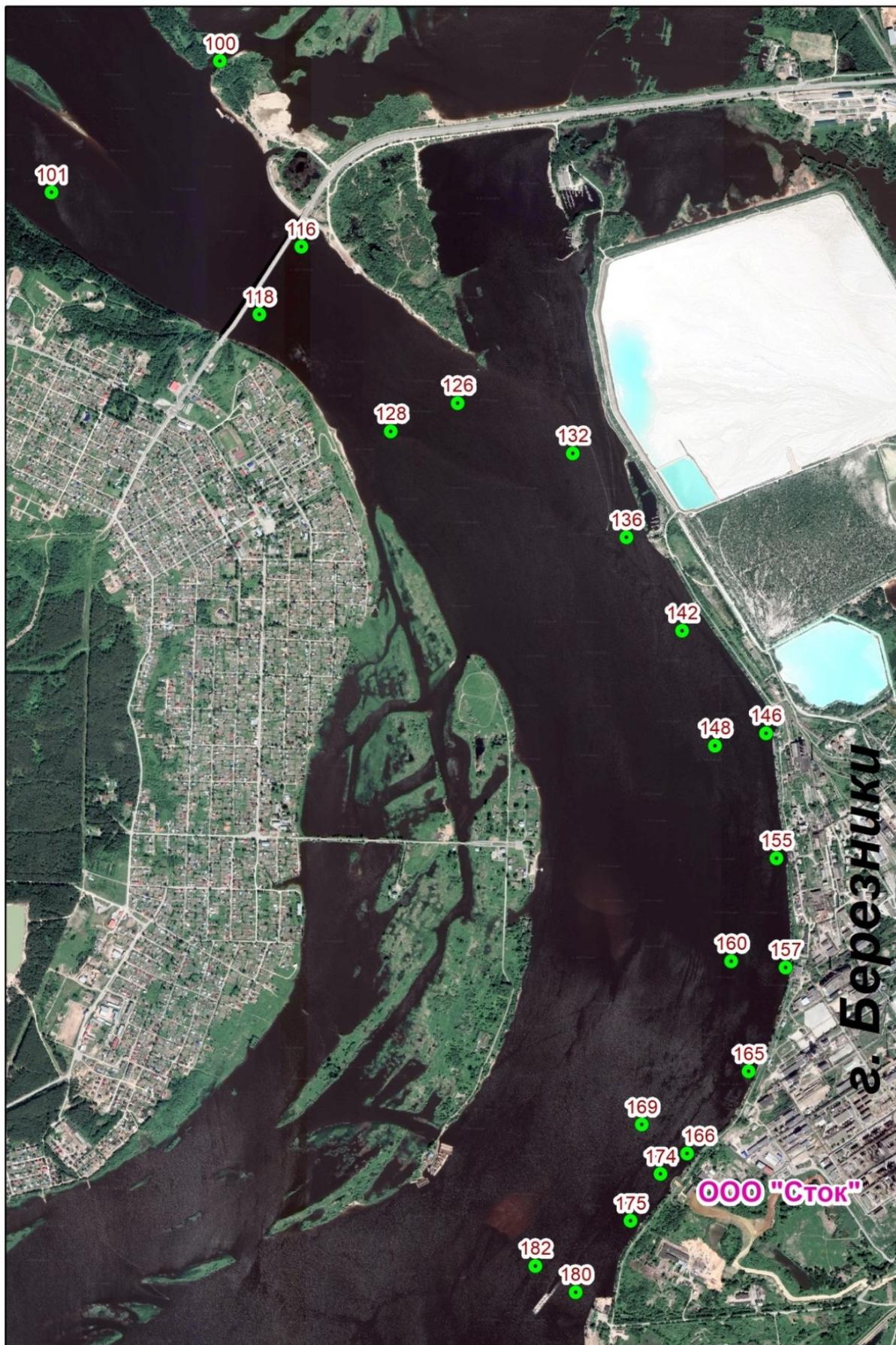


Рис. 1. Расположение вертикалей измерений на рассматриваемом участке Камского водохранилища

Таблица 1

Метеорологические и гидрологические характеристики, наблюдаемые в даты проведения полевых работ на Камском водохранилище в районе г. Березники

Дата	Скорость ветра, м/сек	Направление ветра	Расход воды р. Кама – п. Тюлькино, м ³ /сек
13.05.2021	1	ЮЮЗ	5708
18.06.2021	2-3	ССЗ	486
20.07.2021	2-3	Ю	412
10.08.2021	2	С	525
31.08.2021	1	ССВ	366
13.09.2021	2	ЮЮЗ	603

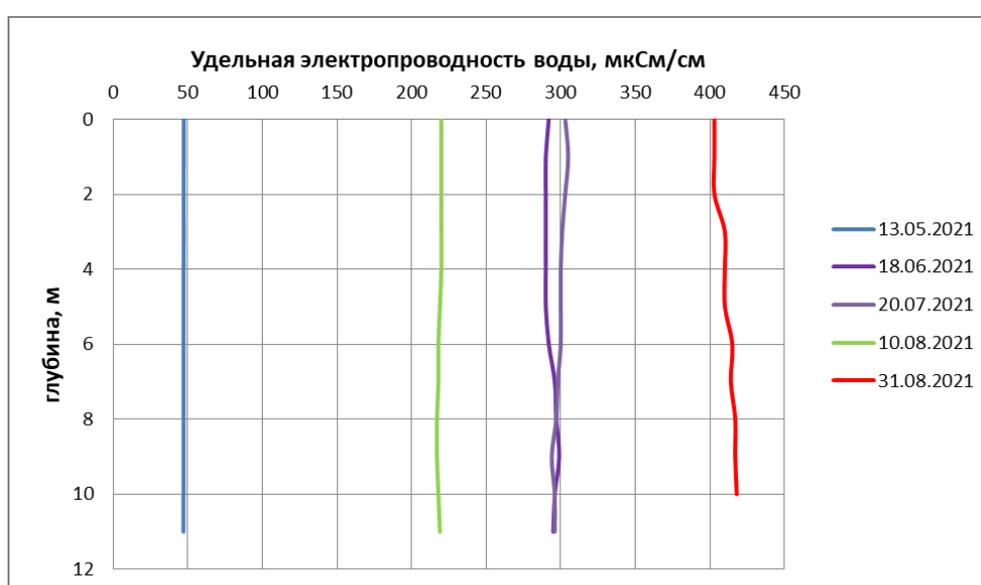


Рис. 2. Распределение по глубине удельной электропроводности воды на вертикали № 118

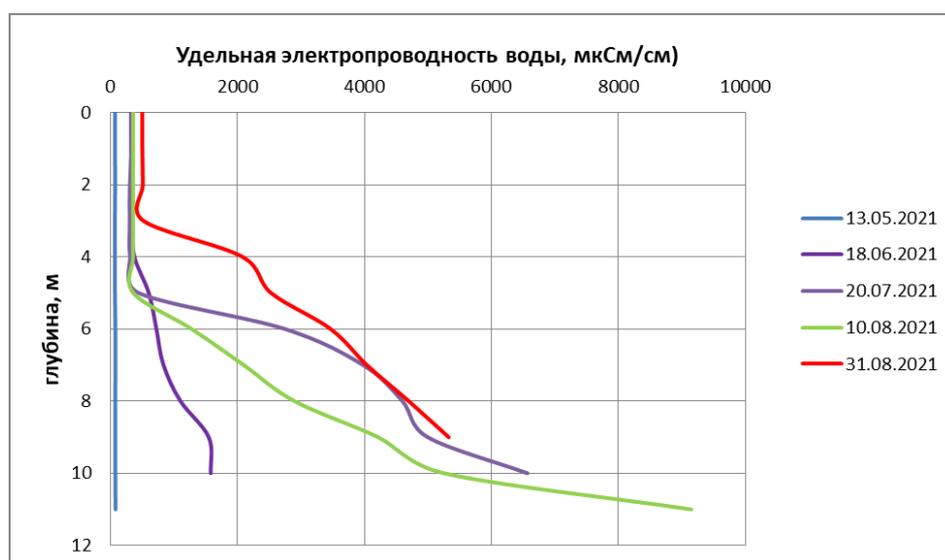


Рис. 3. Распределение по глубине удельной электропроводности воды на вертикали № 174

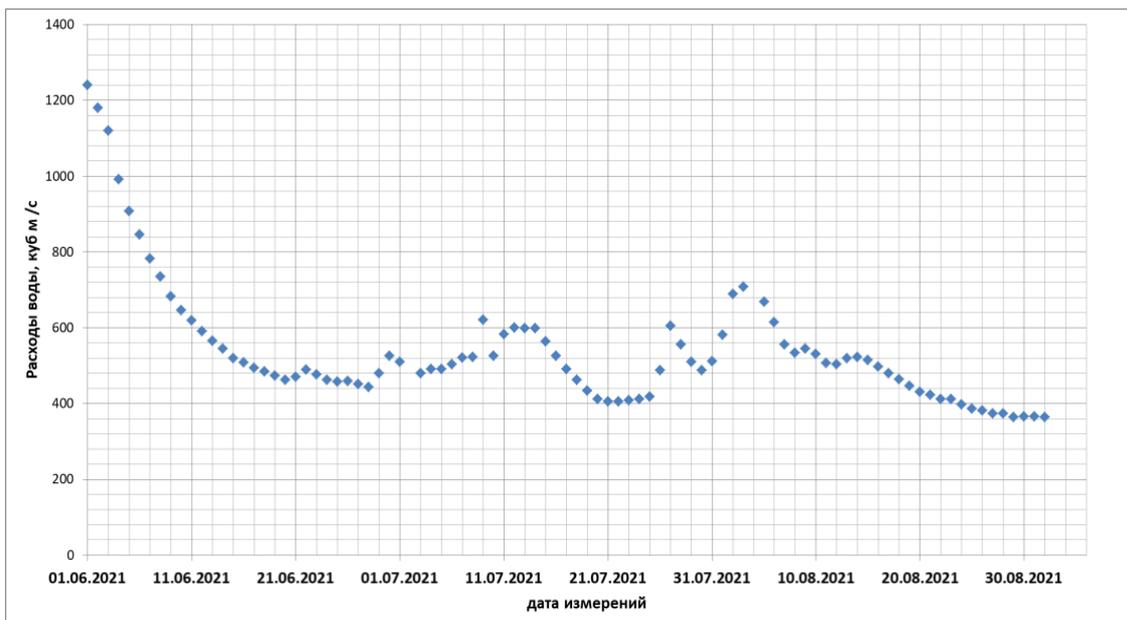


Рис. 4. Динамика расходов воды по посту р. Кама – п. Тюлькино

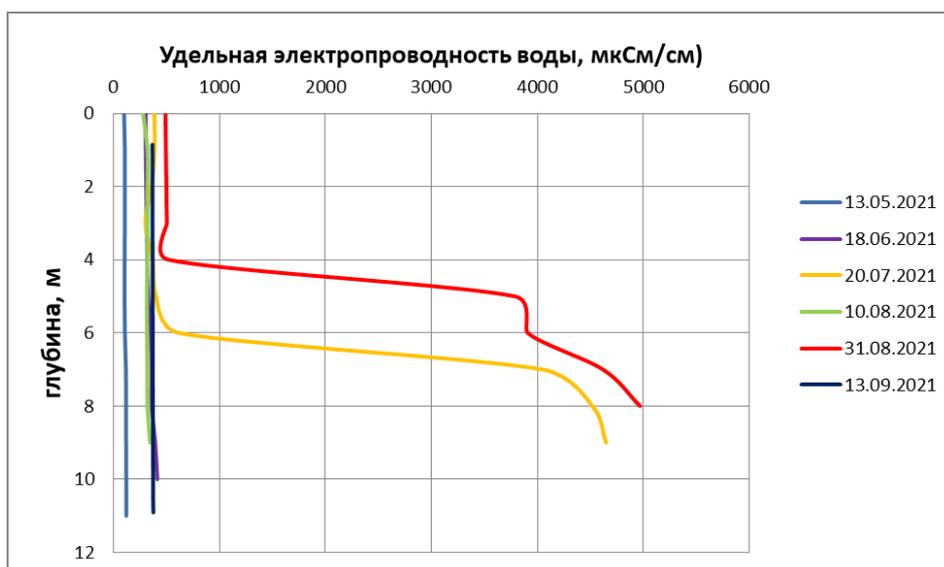


Рис. 5. Распределение по глубине удельной электропроводности воды на вертикале № 146

Обсуждение результатов

Наиболее простым и, казалось бы, очевидным объяснением наблюдаемого значительного увеличения минерализации воды в придонной области являются не декларируемые латентные сбросы высокоминерализованных плотных сточных вод. Для создания таких зон загрязнения интенсивность данных латентных источников должна быть весьма значительна, их расход должен составлять $\sim 1 \text{ м}^3/\text{сек}$. Организовать «скрытый» источник такой интенсивности весьма сложно, многочисленные обследования береговой полосы не выявили подобных источников. В тоже время в результате достаточно интенсивной продольной дисперсии непосредственно в самом водном объекте происходит выравнивание полей загрязнений и их резкие изменения во времени, как это наблюдается на рисунке 6, практически невозможны [6]. Для достижения такого результата источник загрязнения должен располагаться непосредственно вблизи водозабора, что технически сложно организовать.

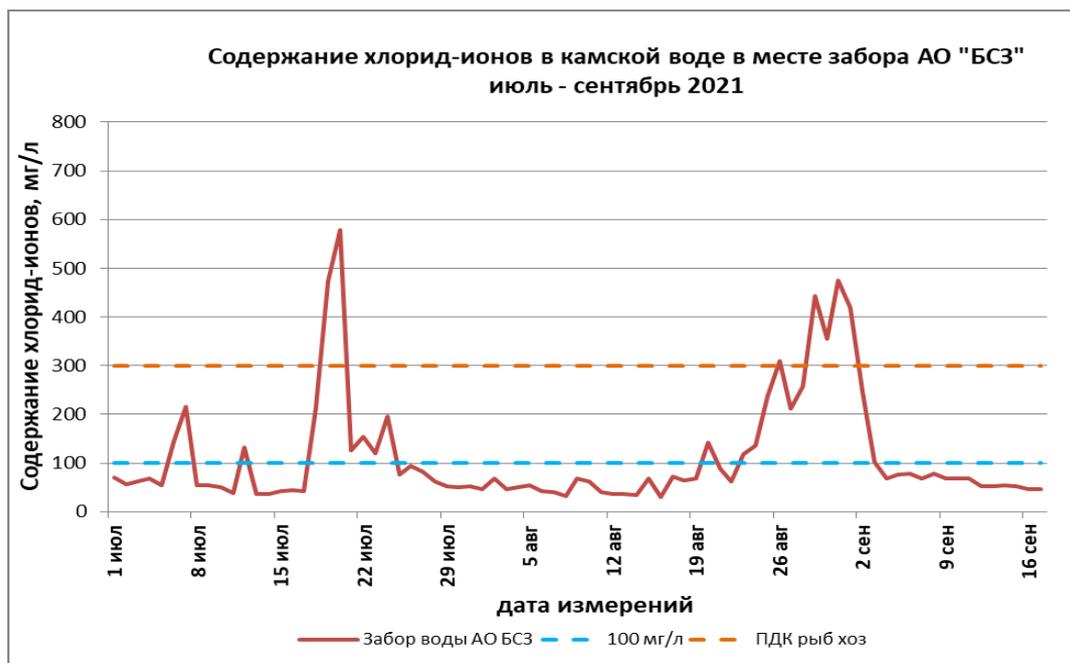


Рис. 6. Динамика содержания хлоридов на глубинном водозаборе АО «БСЗ»

Согласно второй, так же достаточно активно обсуждаемой гипотезе, наблюдаемое резкое увеличение минерализации воды в придонной области связывается с приносом обратным течениями загрязняющих веществ от выпуска сточных вод ООО «Сток».

В качестве основного аргумента в пользу данной гипотезы указываются весьма малые скорости течений, наблюдаемые в период летне-осенней межени, которые на рассматриваемом участке водохранилища составляют $V \sim 0.05-0.1$ м/сек. Сброс сточных вод проводится неравномерно и расход отводимых стоков может варьировать в диапазоне $0 < q < \sim 6$ м³/сек.

В работе [6] на основе проведения вычислительных экспериментов в 2D- и 3D-постановке было показано, что при наблюдаемых ветрах данная ситуация практически невозможна. С целью получения дополнительных материалов для оценки оправданности этой гипотезы были выполнены суточные наблюдения за измерениями скоростей течений и колебаниями удельной электропроводности и температуры воды. Измерения были выполнены с помощью многопараметрического измерителя течений MIDAS ECM производства компании Valeport [9]. Данный прибор является точечным универсальным измерителем параметров течения, разработанным для длительной работы и простого развертывания. Архитектура электроники Valeport позволяет подключать множество дополнительных датчиков, а также использовать различные варианты коммуникаций, что делает его одним из немногих мультипараметрических измерителей скорости течения, позволяя работать измерителю как в режиме реального времени с помощью длинного кабеля (до нескольких тысяч метров), так и при автономных развертываниях. Диапазон измеряемых скоростей потока для данного прибора находится в пределах от 0,001 м/с до 5 м/с. Данный прибор является измерителем скоростей течений электромагнитного типа, базирующимся на эффекте Фарадея. Он позволяет также определять физические свойства водной массы: электрическую проводимость, температуру, давление, мутность. Прибор был установлен на характерной глубине расположения водозабора ~ 10 м, измерения рассматриваемых параметров проводилась с частотой 1 регистрация в 5 минут. Выполненный комплекс из-

мерений показал, что скорости течений имеют ярко выраженные значительные внутрисуточные колебания (рисунок 7), но при этом обратных течений, способных транспортировать загрязненные водные массы вверх по течению, в период исследований (13-14 сентября 2021 года) обнаружено не было.

В тоже время, как следует из таблицы 1, в периоды, когда на исследуемом участке водохранилища наблюдалась вертикальная стратификация водных масс, не были зафиксированы какие-либо аномальные метеорологические явления. Более того, как следует из таблицы 1, 31.08.21 преобладающим был ветер, отличный от южной направленности, 19.07-20.07.21, хотя и был ветер южной направленности, но весьма слабый, близкий к тому, что наблюдался 12.09-13.09.21. Исходя из этого следует, что факторы, определяющие вертикальную стратификацию водных масс на рассматриваемом участке водохранилища, носят внутренний эндогенный характер, определяемый гидрологическим режимом водохранилища.

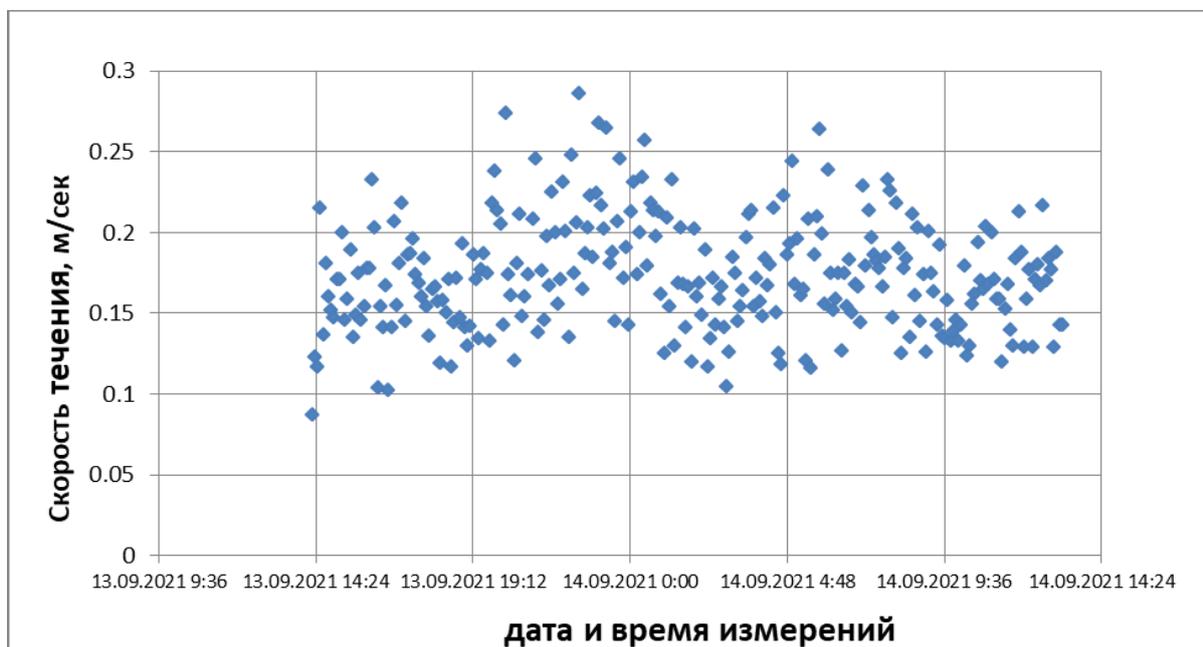


Рис. 7. Внутри суточная динамика скорости течения в р. Кама (Камском водохранилище) на глубине 10 м (96,6 м БС)

Как следует из таблицы 1, в периоды, когда обнаруживалась вертикальная стратификация водных масс, на рассматриваемом участке водохранилища наблюдались весьма низкие расходы воды, не превышающие $412 \text{ м}^3/\text{сек}$. Сам механизм формирования наблюдаемой вертикальной стратификации, его воспроизводство в рамках вычислительных экспериментов на основе использования современных гидродинамических моделей требует дополнительных серьезных исследований. В тоже время формируемая вертикальная стратификация водных масс оказывает существенное влияние на устойчивость бесперебойного технического водоснабжения промышленных предприятий г. Березники.

Выводы

1. Выполненные мониторинговые исследования позволили выявить особенности формирования вертикальной стратификации водных масс Камского водохранилища в районе г. Березники, оказывающие влияние на устойчивость функционирования системы технического водоснабжения.

2. В течение летней межени рассмотрена непрерывная динамика колебаний содержания хлоридов в воде, забираемой на техническом водозаборе АО «БСЗ» из р. Кама (Камское водохранилище), с частотой отбора проб 4 раза/сутки. Показано, что в придонных горизонтах могут наблюдаться периоды продолжительностью до ~ 10-12 суток, когда содержание лимитирующего ингредиента, хлорид-иона, может увеличиваться более чем на порядок. В эти периоды, как показали выполненные исследования, в рассматриваемой области Камского водохранилища формируется существенная вертикальная стратификация водных масс.

3. Проведен анализ возможных факторов, определяющих формирование вертикальной неоднородности водных масс в рассматриваемом районе. Показано, что влияние на их формирование недеklarированных латентных источников минерализованных вод, так же как и транспорт загрязняющих веществ от основного выпуска сточных вод г. Березники вследствие формирования обратных течений, маловероятно. По-видимому механизм формирования данных вертикальных неоднородностей водных масс является эндогенным и определяется в первую очередь особенностями гидрологического режима водного объекта. Необходимо продолжить исследования вертикальных структур полей минерализации в Камском водохранилище в районе г. Березники, включающие в себя использование современных гидродинамических моделей и анализ влияния внешних факторов.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ
в рамках проекта № 20-45-596028.*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГН 2.2.5.1315-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. (с изменениями на 13.07.2017 г.). – Текст электронный. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/901862249>. (Дата обращения 1.10.21).
2. Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения» (с изменениями на 10.03.2020 г.): Приказ М-ва сельского хоз-ва РФ от 13 декабря 2016 г. № 552. – Текст электронный. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/420389120>. (Дата обращения 1.10.21).
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., Мирошниченко С.А. Техногенное воздействие Соликамско-Березниковского промузла на поверхностные водные объекты // Горн. журн. – 2008. – № 10. – С. 92-96.
5. 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. – № статьи 1638. – DOI: 10.3390/w13121638.
6. 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. – DOI: 10.17076/Lim1419.
7. 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. – DOI: 10.31857/S0321059620050120.
8. Самолубов Б.И. Плотностные течения и диффузия примесей. – М.: URSS, 2007. – 350с.: ил., табл.
9. SWiFT CTD: сайт. – Текст электронный. – URL: <https://www.valeport.co.uk/products/midas-ecm/> (Дата обращения 1.10.21).