

БИОМОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД ВОЛЫНЦЕВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА ФЛУОРИМЕТРИИ

© 2024

Чуфицкий С.В., Беспалова С.В., Романчук С.М.

Донецкий государственный университет (г. Донецк, Российская Федерация)

Аннотация. В статье рассматривается состояние питьевого Волынцевского водохранилища и его притоков в условиях значительного изменения гидрорежима и загрязнения сточными шахтными водами. Рассматривается состояние альгофлоры водного объекта, представлены результаты изучения видового состава фитопланктона, содержания основных фотопигментов и фотосинтетической активности микроводорослей. В исследовании представлены результаты применения метода флуориметрической оценки состояния клеток фитопланктона как основного биоиндикатора состояния водной среды. Исследовались воды Волынцевского водохранилища и р. Булавин в окрестностях г. Енакиево. Данные водные объекты подвержены значительному техногенному воздействию: в результате интенсивного водопользования ресурсов водохранилища произошло значительное снижение уровня воды и, как следствие, ухудшение качества воды. Проведенные исследования показали значительное превышение допустимых норм по содержанию ионов магния, сульфатов, общей жесткости и щелочности в пробах воды. Показано негативное воздействие загрязнения поверхностных вод на видовой состав альгофлоры, а также фотосинтетическую активность клеток фитопланктона. Полученные материалы могут служить основой для дальнейшего мониторинга питьевых водохранилищ региона. Сложившаяся ситуация требует постоянных мониторинговых наблюдений, направленных на выявление и устранение всех источников загрязнения исследуемых водных объектов.

Ключевые слова: экологический мониторинг; флуориметрия; кривые индукции флуоресценции; спектрофотометрия; фотопигменты; фитопланктон; Волынцевское водохранилище; река Булавин; поллютанты; шахтные воды.

BIOMONITORING OF THE SURFACE WATERS OF THE VOLYNTSEVO RESERVOIR USING THE FLUORIMETRY METHOD

© 2024

Chufitskiy S.V., Bepalova S.V., Romanchuk S.M.

Donetsk State University (Donetsk, Russian Federation)

Abstract. The article examines the state of the drinking Volyntsevo reservoir and its tributaries in conditions of significant changes in the hydraulic regime and pollution by waste mine waters. The state of algaeflora of a water body is considered, the results of studying the species composition of phytoplankton, the content of basic photopigments and photosynthetic activity of microalgae are presented. The study presents the results of the application of the method of fluorimetric assessment of the state of phytoplankton cells as the main bioindicator of the state of the aquatic environment. The research was conducted in the vicinity of Yenakievo for the Volyntsevo reservoir and the Bulavin river. These water bodies are subject to significant man-made impacts: as a result of intensive water use of reservoir resources, there has been a significant decrease in water levels and, as a result, a deterioration in water quality. The conducted studies have shown a significant excess of the permissible standards for the content of magnesium ions, sulfates, total hardness and alkalinity in water samples. The negative impact of surface water pollution on the species composition of algaeflora, as well as the photosynthetic activity of phytoplankton cells, has been shown. The obtained materials can serve as a basis for further monitoring of drinking reservoirs in the region. The current situation requires constant monitoring observations aimed at identifying and eliminating all sources of pollution of the studied water bodies.

Keywords: environmental monitoring; fluorimetry; fluorescence induction curves; spectrophotometry; photopigments; phytoplankton; Volyntsevo reservoir; Bulavin River; pollutants; mine waters.

Введение

Водоснабжение Донецкого региона на 85% осуществляется за счет поверхностных источников пресной воды. Основную часть питьевой воды регион получал из канала «Северский Донец – Донбасс» [1, с. 240]. В связи с военно-политической обстановкой подача воды через канал была прекращена, что значительно обострило проблему обеспечения населения питьевой водой. Проблемы водообеспечения региона частично решали водохранилища. Однако даже при условии значительного ограничения подачи воды, в течение 2022 года уровень воды в водохранилищах значительно снизился [1, с. 240]. Исследова-

телями отмечалось ухудшение качества питьевой воды, потребляемой населением [2, с. 729–731; 3, с. 34]. Также стоит учесть, что основные реки региона подвержены значительному загрязнению шахтными, промышленными и бытовыми стоками [4, р. 851–855; 5, с. 140; 6, с. 503]. Даже с учетом возможных перспектив развития региона [7, с. 215], проблема водообеспечения стоит особенно остро. Строительство нового водовода «Дон – Северский Донец» лишь частично решило проблему водоснабжения и позволило возобновить наполняемость водохранилищ [8, с. 61].

Таким образом, возникает необходимость мониторинга состояния имеющихся источников водоснаб-

жения, в частности питьевых водохранилищ. Целью данного исследования являлась оценка состояния Волынцевского водохранилища и его основных притоков в условиях значительного обмеления. Учитывая трудоемкость ряда методов оценки состояния водного объекта (физико-химический анализ проб, определение видового состава фитопланктона и проч.), возникает необходимость включения экспресс-методов анализа водной среды. Поэтому в программу мониторинга был включен флуориметрический метод анализа фотосинтетической активности клеток фитопланктона как информативный и неинвазивный метод биоиндикации [9, р. 665–666; 10, с. 68–71].

Характеристика водного объекта

Волынцевское водохранилище расположено восточнее города Енакиево и обеспечивает потребность его населения и еще 14 городов в питьевой воде. Объем водохранилища составляет около 14–15 млн м³, площадь зеркала – около 3,2 км², площадь водосбора – порядка 260 км² [11, с. 24]. Основным притоком водохранилища является река Булавин (реже Булавинка или Булавина) протяженностью около 39 км с общей площадью водосбора порядка 330 км² [12, с. 137]. Река входит в бассейн реки Миус, при слиянии с р. Садки дает начало р. Крынка, на которой располагаются Ханженковское и Зуевское водохранилища, связанные с Ольховским водохранилищем через р. Ольховая [12, с. 137; 13, с. 47–48], которая также подвергается значительному загрязнению шахтными стоками [4, р. 851–855]. Также приток воды в Волынцевское водохранилище осуществляется через мелкие балки, в которые производится сброс шахтных и хозяйственно-бытовых вод.

Материалы и методика исследований

При исследовании состояния поверхностных вод Волынцевского водохранилища мониторинговые точки выбирали таким образом, чтобы наиболее полностью учесть все возможные источники загрязнения. Потен-

циальными источниками загрязнения являются сточные шахтные воды шахт № 3 ш/у «Александровское», «Углегорская», «Булавинская» и «Ольховатская». Всего было выделено семь мониторинговых точек (рис. 1). Точка 1 располагается на русле р. Булавин, точки 3 и 6 – на территории водохранилища. Точка 2 расположена на территории балки Должик на русле реки Булавин. Мониторинговые точки 4 и 5 расположены на территории балок Хацапетовская и Еленовская, куда также попадают шахтные воды. Ниже по течению р. Булавин, после водохранилища образовано два искусственных проточных водоема, в которые попадают промышленные стоки (точка 7).

Для отобранных проб воды проводился анализ физико-химических показателей. Полученные значения сравнивали с предельно допустимыми концентрациями согласно нормативным документам [14; 15]. Освещенность измеряли с помощью люксметра СТ-1330В.

Сбор фитопланктона и определение видовой принадлежности осуществляли общепринятыми методами [16, с. 28–35]. Подсчет численности клеток выполняли с помощью камеры Горьева.

Определение содержания хлорофилла и других фотопигментов выполняли спектрофотометрическим методом из ацетоновых вытяжек [17]. Флуориметрический анализ проб воды проводился с помощью флуориметров Phyto-PAM (Walz, Германия) и ФС-2 (СКТБ «Турбулентность» ДонГУ). Перед проведением флуориметрических измерений пробы воды помещали в затемненное место не менее чем на 30 минут для темновой адаптации. В ходе исследования проводили измерение общего содержания хлорофилла и регистрацию световых и индукционных кривых флуоресценции хлорофилла. Анализ индукционных кривых выполняли на основании ОЖР-теста [10, с. 85–95; 18, р. 452–453] с помощью программы PyPhotoSyn. Достоверность отличий средних значений полученных данных определяли с использованием критерия Вилкоксона [19, с. 54–57].



Рисунок 1 – Мониторинговые точки Волынцевского водохранилища и его притоков

Результаты исследований
и их обсуждениеОпределение видового состава
фитопланктона Волынецовского
водохранилища и его притоков

Для всех исследуемых проб было характерно низкое содержание клеток фитопланктона. Наиболее богатый видовой состав выявлен для мониторинговой точки 7 – 22 вида и 5 определено до рода. Наиболее часто встречались представители отряда Chlorophyta: *Chlorella vulgaris* Beij., *Crucigenia fenestrata* Schmidle, *Kirschneriella obesa* Schmidle, *Scenedesmus quadricauda* (Turpin) Brébisson, а также отряда Bacillariophyta: *Synedra acus* Kützing, *Cyclotella* sp. Низкая численность клеток фитопланктона обуславливала встречаемость некоторых видов как единичных экземпляров: *Actinastrum hantzschii* Lagerh., *Caloneis amphibiaena* (Bory) Cleve, *Coelastrum sphaericum* Nägeli, *Euglena viridis* Ehrenberg, *Monomorphina pyrum* Mereschk., *Navicula cryptocephala* Kützing, *Oscillatoria formosa* Bory ex Gomont, *Synedra pulchella* Kützing, *Tetraedron minimum* Hansgirg, *Tribonema minus* Hazen, а также родов *Aphanothece* и *Gyrosigma*. Наиболее разнообразно был представлен отряд Chlorophyta, который включал 7 порядков, 9 семейств и 24 вида. Отряды Streptophyta и Chrysophyta были представлены единичными видами – *Closterium parvulum* Nägeli и *Chrysooccus rufescens* Klebs. Отряды Bacillariophyta и Cyanobacteria были представлены примерно равным числом видов – 8 и 6 соответственно. Ядро альгофлоры исследуемых водных объектов составляет порядок Sphaeropleales (41,9% от общего числа видов), который включал представителей родов *Ankistrodesmus*, *Coelastrum*, *Crucigenia*, *Kirschneriella*, *Monoraphidium*, *Pediastrum*, *Scenedesmus* и *Tetraedron*. Для остальных порядков было характерно более низкое видовое разнообразие. Так, порядки Bacillariales, Chromulinales, Desmidiiales, Melosirales, Stephanodiscales, Synechococcales, Tribonematales включали в себя всего по 2,3% видов от их общего количества, а порядки Euglenales, Naviculales, Oocystales, Oscillatoriales – по 4,65%.

По численности в исследуемых мониторинговых точках доминировали представители отрядов Chlorophyta и Bacillariophyta. В балках Хацапетовская и Еленовская было характерно преобладание отряда Bacillariophyta – 67%. Основу альгофлоры в данных мониторинговых точках составляли представители родов *Synedra* и *Cyclotella*. Снижение численности наблюдали в районе балки Должик (точка 2) – 73 тыс. кл./л, около н.п. Ольховатка (точка 1) суммарная численность клеток составляла порядка 185 тыс. кл./л. Непосредственно перед впадением в водохранилище общая численность снижалась до 43,6 тыс. кл./л.

В мониторинговой точке 6 значительно возросла общая доля цианобактерий (*Microcystis aeruginosa* Kützing, *Synechocystis minuscula* Woronichin и *Oscillatoria agardni* Gomont) – до 10%, что может свидетельствовать о повышении степени эвтрофикации водоема.

Русло реки Булавины на данном участке образует два проточных водоема, которые подвергаются регулярному загрязнению. На берегу второго водоема (точка 7) находятся шахтные породные отвалы, кроме того, восточнее располагаются производственные отстойники, куда поступают промышленные сточные

воды, попадающие в водоем. Наиболее многочисленными были пробы из мониторинговой точки 7 – около 443 тыс. кл./л. В данной мониторинговой точке одним из многочисленных являлся вид *Lagerheimia genevensis* Chodat., который редко встречался в других пробах воды. Кроме того, наиболее многочисленными видами для отдела Chlorophyta являлись *Crucigenia fenestrata*, *Monoraphidium contortum* Komárk.-Legn., *Scenedesmus quadricauda* и *Tetraedron minutissimum*. Основу отдела Bacillariophyta составлял вид *Synedra acus* Kützing, характерный для большинства исследуемых проб. Доля цианобактерий возрастала до 13% от общей численности в сравнении с мониторинговой точкой 6. Были обнаружены *Gleocapsa turgida* Hollerbach и *Gomphosphaeria lacustris* Chodat.

Распределение биомассы фитопланктона отличалось от численности. Для мониторинговых точек 1–3 были получены наименьшие значения биомассы – от 0,018 до 0,030 г/л. Основной вклад в биомассу составляли отделы Chlorophyta, Bacillariophyta и Streptophyta. Распределение между вкладом каждого из отделов фитопланктона на участке между мониторинговыми точками 1 и 3 значительно изменялось. Около н.п. Ольховатка преобладали отделы Chlorophyta (64%) и Bacillariophyta (35%). Соотношение между общей долей биомассы между отделами Chlorophyta и Bacillariophyta в водах балки Должик изменялось в сторону преобладания диатомей – 27 и 73% соответственно. В русле реки Булавины около Волынецовского водохранилища (точка 3) преобладал отдел Streptophyta, вид *Closterium parvulum*. Также значительную долю биомассы составляли отделы Bacillariophyta (25%) и Euglenozoa (12%).

В балке Еленовской отдел Bacillariophyta составлял 99,73% от общей биомассы фитопланктона и был представлен двумя родами – *Synedra* и *Gyrosigma*. В водах балки Хацапетовской основной вклад в биомассу составляли роды *Synedra*, *Cyclotella*, *Melosira* и *Navicula*. Общее количество биомассы в Волынецовском водохранилище составляло 0,013 г/л, что ниже, чем в северных притоках (0,131 и 0,052 г/л в точках 4 и 5 соответственно). Отсутствие прироста биомассы, так же как и численности, фитопланктона обусловлено значительным снижением уровня воды в водохранилище. Наибольшее суммарное значение биомассы было получено для мониторинговой точки 7 – 0,20 г/л, 57% которой составлял отдел Streptophyta. Отделы Bacillariophyta и Chlorophyta составляли всего 22 и 18% от общей биомассы фитопланктона.

Физико-химические показатели
исследуемых проб воды

Измерения физико-химических параметров проб воды выполняли на базе филиала «Центральная контрольно-исследовательская проектно-изыскательская водная лаборатория» ГУП «Вода Донбасса». Результаты измерений представлены в таблице 1, превышения предельно допустимых концентраций веществ выделены полужирным шрифтом.

Для оценки качества воды определяли класс загрязненности воды на основании определения удельного комбинаторного индекса загрязненности воды (УКИЗВ или S'_A), а также значения обобщенных оценочных баллов по каждому из компонентов (S_i) [20].

На момент отбора проб средняя освещенность составляла 26 тыс. Лк. Температура воды в притоках была на несколько градусов ниже, чем в русле реки и

водохранилище. Наименьшая температура была зафиксирована для проб из балок Должик и Хацапетовская (+10 и +11°C, соответственно), что обусловлено притоком грунтовых вод.

В водах Волынецовского водохранилища содержание биогена снижалось в 10 раз и составляло 0,5 мг/л. При этом значительно возросло содержание аммония – до 0,15 мг/л, а в мониторинговой точке 7 – до 0,3 мг/л. Одной из причин повышения содержания аммония может служить попадание хозяйственно-бытовых сточных вод. Индикатором такого рода загрязнения являются цианобактерии, общее содержание и видовое разнообразие которых возросло на данном участке.

Для всех мониторинговых точек было характерно превышение ПДК для магния. Для отдельных проб получено превышение предельно допустимых норм для содержания сульфатов, общей жесткости, щелочности и сухого остатка, что характерно для загрязнения поверхностных вод шахтными стоками [21, с. 154–158]. Наибольшая степень загрязнения была выявлена для мониторинговой точки 7, где содержание общего сухого остатка и сульфат-ионов превышало нормы более чем в три раза, что обусловлено попаданием значительного количества промышленных стоков в поверхностные воды р. Булавин на данном участке. Кроме того, значительное загрязнение было характерно для участка русла реки около Ольховатской и Булавинской шахт (мониторинговые точки 1 и 5, соответственно).

Согласно полученным для каждого из веществ значениям УКИЗВ ($S'_A = 2,03$), воду в русле реки можно характеризовать как загрязненную (3 класс загрязненности, разряд «а») [20].

Оценка содержания фотосинтетических пигментов в исследуемых пробах методом спектрофотометрии и флуориметрии

Для всех исследуемых мониторинговых точек было характерно преобладание хлорофилла *b*, чему способствует доминирование диатомовых микроводорослей (рис. 2; табл. 2).

Для мониторинговой точки 2 выявлено только присутствие хлорофилла *b*, концентрация которого колебалась около пороговых значений – 0,05 мкг/л. Предельно низкие значения концентраций фотопигментов были получены и для мониторинговой точки 5. Это соответствует результатам альгологических исследований. Для пробы из балки Хацапетовская было характерно наибольшее суммарное содержание фотопигментов с преобладанием хлорофилла типов *a* и *b*.

В водохранилище и русле р. Булавин после него (точки 6 и 7, соответственно) возрастала доля вспомогательных фотопигментов, характерных для цианобактерий и зеленых водорослей, что также согласуется с изменением структуры альгофлоры данных водных объектов (рис. 2).

Для всех исследуемых проб, кроме точки 5, не было выявлено присутствия хлорофиллов c_1 и c_2 . Низкая численность микроводорослей, а также общая бедность проб не позволяет выявить вклад отдельных видов водорослей в пигментный состав фитопланктона.

Отношения оптических плотностей экстрактов, косвенно отражающие соотношения концентраций пигментов, могут служить показателями физиологического состояния, структуры и разнообразия фитопланктонного сообщества. Индекс Маргалефа ($I_{430/1664}$) ха-

рактеризует соотношение общих каротиноидов и хлорофилла *a*. Повышение этого индекса в мониторинговых точках 6 и 7 свидетельствует об ухудшении «физиологического» состояния фитопланктона и увеличении его пигментного разнообразия [22, с. 163]. Альгологические исследования выявили значительное изменение видовой структуры альгофлоры в данных мониторинговых точках с перераспределением доминантных отделов фитопланктона по численности и биомассе.

Содержание фотопигментов, определенное по флуоресценции хлорофилла, соответствовало результатам спектрофотометрии. Согласно данным флуориметрии, наибольшая концентрация хлорофилла *a* была получена в пробе из балки Хацапетовской – 0,9 мкг/л. В водохранилище содержание хлорофилла *a* составляло 0,56 мкг/л, р. Булавин (точка 7) – 0,4 мкг/л, тогда как, согласно результатам спектрофотометрии, содержание пигмента составляло 0,82 и 0,68 мкг/л соответственно.

Определение содержания хлорофилла *b* выявило большее расхождение между результатами применяемых методов. По данным флуориметрии, содержание фотопигмента колебалось в пределах 0,3–0,36 мкг/л для всех мониторинговых точек, тогда как результаты спектрофотометрии обладали большей вариативностью. Кроме того, по флуориметрическим данным не удалось выявить присутствия цианобактерий в исследуемых пробах. Вероятно, низкая интенсивность полезного сигнала приводила к перекрыванию флуоресценции от разных фотопигментов.

Регистрация световых кривых флуоресценции хлорофилла

Световые кривые дают информацию о состоянии световой адаптации и фотосинтетической способности образца. Световая кривая отражает зависимость квантового выхода и относительной скорости переноса электронов (ETR) от интенсивности падающего фотосинтетически активного излучения (PAR).

Квантовый выход для хлорофилла *a* на малых интенсивностях PAR составлял около 0,7 (рис. 3: А), что соответствует нормальному сигналу клеток фитопланктона в фазе роста. При повышении интенсивности света до 164 мкмоль квант/м²с наблюдали понижение квантового выхода для фитопланктона из р. Булавин (точка 7) до 0,4, тогда как для остальных проб данный показатель колебался в диапазоне от 0,6 до 0,65. На высоких интенсивностях действующего света (от 564 до 764 мкмоль квант/м²с) наблюдается четкое распределение между отдельными пробами: для мониторинговых точек 1 и 4 наблюдали высокие значения квантового выхода флуоресценции – около 0,5, что свидетельствует о функциональном благополучии клеток фитопланктона; для водохранилища (точка 6) квантовый выход снижался до 0,45, р. Булавин (точка 7) – до 0,3, что указывает на ухудшение физиологического состояния клеток водорослей.

Четкое распределение по флуоресценции хлорофилла *a* для исследуемых проб наблюдали и при регистрации скорости электронного транспорта (рис. 3: Б). Максимальное значение ETR для фитопланктона балки Хацапетовской (точка 4) и р. Булавин (точка 1) составляло 162 и 156 отн. ед., соответственно. Для проб из водохранилища данный показатель снижался до 139 отн. ед., а для р. Булавин в мониторинговой точке 7 – до 105 отн. ед.

Таблица 1 – Физико-химические показатели исследуемых проб воды

Наименование показателей	Точка 1	Точка 2	Точка 3	Точка 4	Точка 5	Точка 6	Точка 7	ПДК
Т, °С	12,5	10	13	11	12,5	14	14,5	–
рН	8,2	8,3	8,2	8,3	8,2	7,6	8,4	6,5–8,5*
Запах (при +20°С), балл	1 зем.	–	1 зем.	1 прел.	–	1 гнил.	2 рыбн.	–
Запах (при +60°С), балл	2 зем.	1 зем.	2 рыбн.	2 рыбн.	2 рыбн.	2 гнил.	2 рыбн.	–
Аммоний, мг/дм ³	0,12	0,1	0,13	0,13	0,10	0,15	0,30	2,0*
Нитриты, мг/дм ³	0,070	0,011	0,03	0,018	0,015	0,030	0,019	3,3*
Нитраты, мг/дм ³	6,6	10,3	5,1	15,4	5,5	0,5	0,6	45*
Хлориды, мг/дм ³	63	34	48,0	63,0	85,0	63,0	139,0	350*
Щелочность, ммоль/дм ³	6,5	5,4	6,4	6,4	10,0	4,5	5,4	0,5–6,5**
Жесткость, ммоль/дм ³	10,9	7,3	10,3	8,1	12,6	8,3	11,5	10**
Кальций, мг/дм ³	119	53	61	53	41	66	81	–
Магний, мг/дм ³	60	57	89	67	128	61	116	50*
Сульфаты, мг/дм ³	601	291	485	359	456	398	1819	500*
Сухой остаток, мг/дм ³	1324	779	1114	979	1714	936	3307	1000*
Кремний, мг/дм ³	4,7	4,9	4,9	5,6	6,3	4,2	4,5	10*

Примечание. Полу жирным начертанием обозначены случаи превышения предельно допустимых концентраций (ПДК) веществ; * – ПДК согласно ГН 2.1.5.1315-03 [14]; ** – ПДК согласно СанПиН 2.1.4.1074-01 [15].

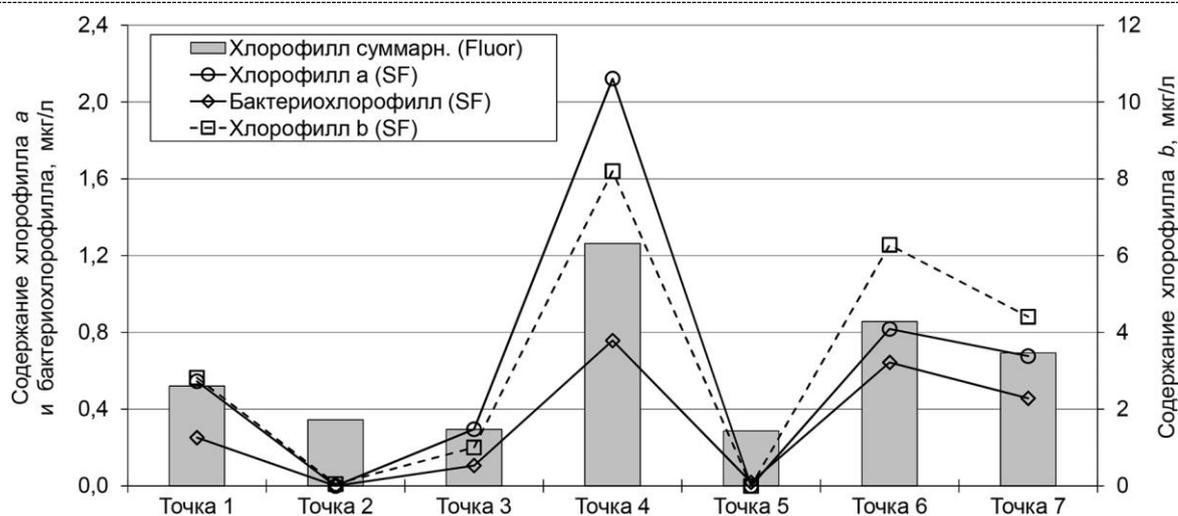


Таблица 2 – Содержание фотосинтетических пигментов в исследуемых мониторинговых точках

	Точка 1	Точка 2	Точка 3	Точка 4	Точка 5	Точка 6	Точка 7
Хлорофилл a ¹ , мкг/л	0,54	–	0,30	2,12	–	0,82	0,68
Хлорофилл a ² , мкг/л	0,62	–	0,31	2,20	0,04	1,19	0,77
Феопитин, мкг/л	0,13	–	0,02	0,15	0,13	0,65	0,16
Хлорофилл b, мкг/л	2,82	0,05	1,00	8,20	–	6,28	4,40
Хлорофилл c ³ , мкг/л	–	–	–	–	0,25	–	–
Каротиноиды ⁴ , мкг/л	0,25	–	0,11	0,76	0,02	0,64	0,46
Каротиноиды ⁵ , мкг/л	0,63	–	0,26	1,89	0,05	1,61	1,14
Индекс Маргалефа (I _{430/I₆₆₄})	2,13	–	1,74	1,87	–	2,35	2,48

Примечание. ¹ – общее содержание хлорофилла a; ² – содержание хлорофилла a без учета феопитина; ³ – суммарная концентрация хлорофилла c₁ и c₂; ⁴ – содержание каротиноидов, характерных для зеленых водорослей и цианобактерий; ⁵ – содержание каротиноидов, характерных для диатомей.

При регистрации световых кривых флуоресценции для хлорофилла b максимальный квантовый выход не превышал 0,6 (рис. 4: А). Для фитопланктона балки Должик даже при низких интенсивностях были характерны низкие значения квантового выхода, не превышающие 0,23, что соответствует низкой функциональной активности фотосистемы II. Для проб из водохранилища и р. Булавын (точка 7) отмечены значительные колебания квантового выхода при повы-

шении интенсивности PAR, что указывает на нарушение процессов фотоадаптации и возможное фотоингибирование фотосистемы II. Для клеток фитопланктона водохранилища при интенсивностях действующего света от 16 до 264 мкмоль квант/м²с квантовый выход был близок к нулевым значениям. Также для данной пробы отмечали низкие значения скорости электронного транспорта (рис. 4: Б). Полученный результат свидетельствует о значительном сни-

жения фотосинтетической активности клеток фитопланктона с преимущественным содержанием хлорофилла *b* в водохранилище в сравнении с руслом р. Булавин и его притоками (точки 1–5). Также низкие значения ETR были получены для пробы воды из балки Должик – максимальное значение скорости не превышало 40 отн. ед. Наибольшие значения ETR были получены для мониторинговых точек 1 и 3 – 117 и 124 отн. ед. соответственно.

Следует учитывать, что ухудшение показателей флуоресценции характерно как для клеток фитопланктона с преимущественным содержанием хлорофилла *a* (например, отделы Chlorophyta и Euglenozoa), так и хлорофилла *b* (например, отдел Bacillariophyta), таким образом, происходило снижение фотосинтетической активности доминантных отделов альгофлоры. Так же, как и при флуориметрическом определении содержания фотопигментов в пробах воды, для мониторинговых точек 6 и 7 не удалось зарегистрировать квантовый выход флуоресценции и ETR для пигментов цианобактерий.

Регистрация кривых индукции флуоресценции хлорофилла

При анализе кривых индукции флуоресценции был выявлен ряд показательных тест-функций: базовые показатели флуоресценции – F_0 , F_m и $\Phi_0 = F_v/F_m$ [9, р. 661–662; 18, р. 452–453; 10, с. 90], параметры эффективности работы фотосинтетического аппарата

– Ψ_0 , Φ_{E_0} и PI [10, с. 93, 95; 18, р. 452–453], специфические потоки энергии через реакционный центр (ПЦ) фотосистемы II (ФС II) – DI_0/RC , RE_0/RC , ET_0/RC , TR_0/RC и ABS/RC [10, с. 91–92; 23, р. 88].

Значения показателей F_0 и F_m согласовываются с результатами измерений содержания хлорофилла в пробах воды (табл. 2). Наименьшие значения интенсивности флуоресценции были получены для мониторинговых точек 3 и 5, а наибольшие – для балки Хацапетовской. Согласно общему фотосинтетическому индексу (PI), в границах нормы функциональная активность фотосистем была характерна только для фитопланктона из балки Хацапетовской (рис. 5). Данный показатель для мониторинговой точки 5 опускался до 0,3. Это свидетельствует о низкой функциональной активности клеток фитопланктона на данном участке. Принимая во внимание результаты анализа световых кривых, прослеживается постепенное ухудшение функционального состояния фитопланктона: на участке русла р. Булавин между мониторинговыми точками 1 и 3 в результате попадания шахтных вод, что также справедливо и для притока балки Еленовская. Другими причинами ухудшения состояния фитопланктона можно назвать обмеление водохранилища, а также появление значительного количества ионов аммония, что может быть следствием попадания бытовых сточных вод.

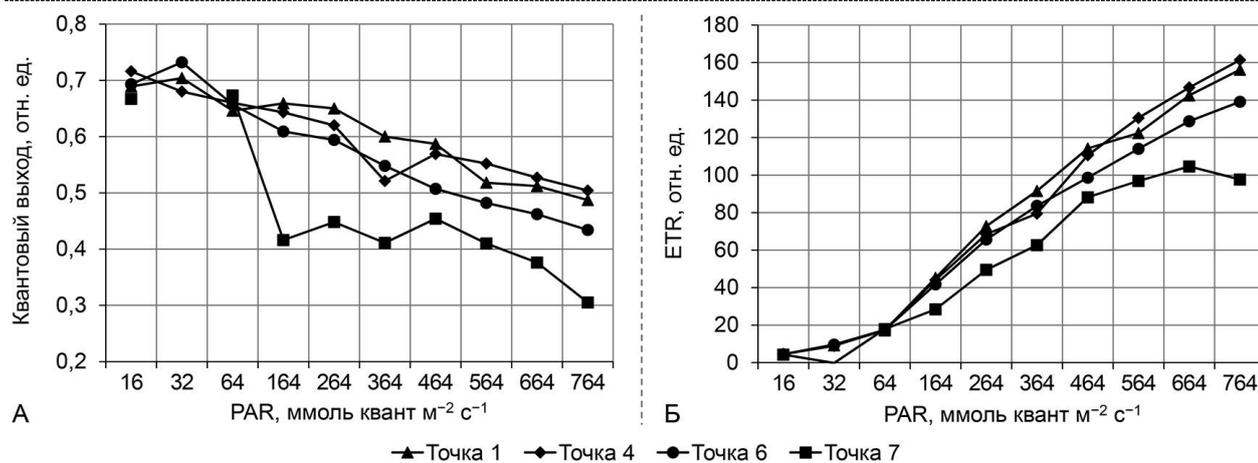


Рисунок 3 – Световые кривые квантового выхода флуоресценции хлорофилла *a* (А) и скорости электронного транспорта – ETR (Б)

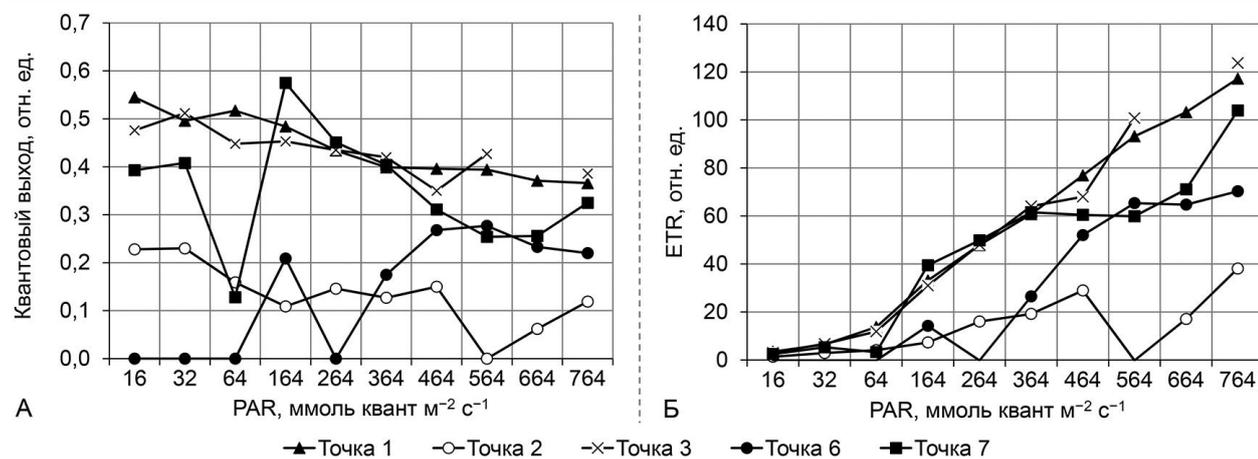


Рисунок 4 – Световые кривые квантового выхода флуоресценции хлорофилла *b* (А) и скорости электронного транспорта – ETR (Б)

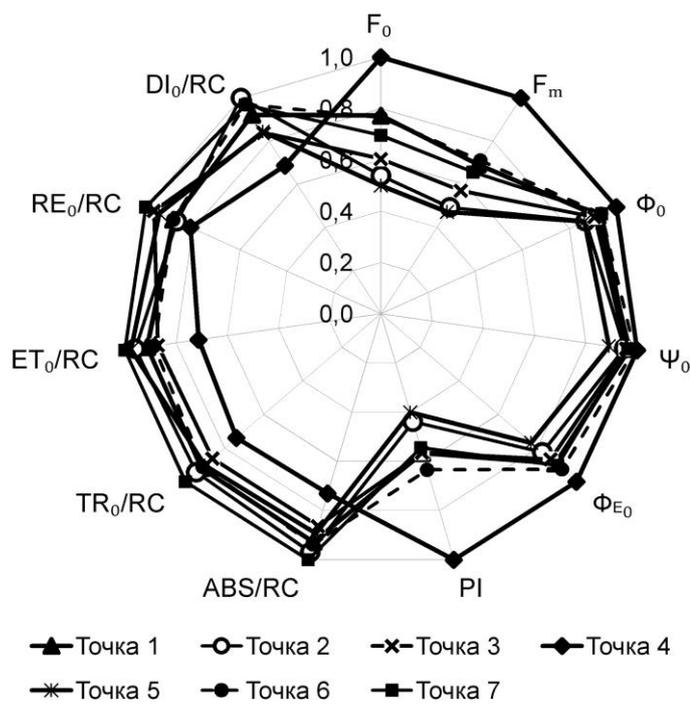


Рисунок 5 – Некоторые параметры ОЖП-кривых для проб воды

Показатели квантового выхода (Φ_0) были выше для мониторинговых точек 2 и 5, в сравнении с индексом PI, и не выходили за границы нормы, однако происходило понижение квантового выхода в р. Булавин и водохранилище на фоне данного показателя для балки Хацапетовская.

Согласно световым кривым флуоресценции, показатели ETR (рис. 3: Б; рис. 4: Б) принимали наибольшие значения для мониторинговой точки 4. При анализе индукционных кривых было выявлено две показательные тест-функции, отражающих протекание электронного транспорта в фотосистеме II на участке первичного хинного акцептора $Q_a - \Phi_{E_0}$ и $\Psi_0 / (1 - \Psi_0)$. Происходило постепенное снижение скорости передачи электронов от первичного акцептора, что и является следствием снижения показателя ETR.

Также наблюдались изменения в функционировании РЦ ФС II – в водохранилище и русле р. Булавин (точка 7) возрастало общее количество энергии, рассеиваемой одним РЦ (DI_0/RC), что также согласуется со снижением значений ETR и Φ_{E_0} .

Заключение

При попадании шахтных сточных вод и обмелении водохранилища происходило изменение структуры альгофлоры со сменой доминантных видов микроводорослей, их численности и биомассы, а также происходил рост числа цианобактерий среди числа доминантных видов в водах водохранилища и р. Булавин. Сложившаяся ситуация привела к значительному ухудшению качества поверхностных вод исследуемых объектов и ухудшению состояния биоты.

На основании флуориметрического анализа проб воды выявлено значительное ухудшение состояния клеток фитопланктона в Волынецовском водохранилище и р. Булавин. Происходило как снижение общей интенсивности флуоресценции фитопланктона (показатели F_0 и F_m), так и функционального состояния фотосинтетического аппарата клеток. Выявлено значительное снижение скорости электронного транспорта (ETR), эффективности передачи световой энергии на

уровне первичного акцептора (Φ_{E_0}), что приводило к снижению общей фотосинтетической активности клеток микроводорослей (PI) и квантового выхода флуоресценции (F_v/F_m). Результаты методов флуориметрического анализа согласуются с изменениями физико-химического состава водной среды, а также с результатами спектрофотометрических исследований. Методы регистрации световых и индукционных кривых флуоресценции хлорофилла являются информативными при проведении экспрессной оценки состояния водного объекта с применением клеток фитопланктона в качестве биоиндикатора.

Список литературы:

1. Шлома В.В. Дефицит воды в Донецкой Народной Республике // Проблемы техногенной безопасности: мат-лы междунар. науч.-практ. конф. молодых учёных и специалистов. 2023. № 12. С. 239–243.
2. Ищенко А.В., Сибирцева И.А., Синько В.Э., Проценко А.О. Анализ качества питьевой воды различных населенных пунктов Донецкой Народной Республики // Научное обеспечение устойчивого развития агропромышленного комплекса: мат-лы междунар. науч.-практ. конф., посв. памяти академика РАН В.П. Зволинского и 30-летию создания ФГБНУ «ПАФНЦ РАН». Солёное Займище, 2021. С. 727–731.
3. Елизарова О.В. Анализ качества воды из источников централизованного водоснабжения ДНР в современных условиях // Архив клинической и экспериментальной медицины. 2023. Т. 32, № 4. С. 32–35.
4. Беспалова С.В., Романчук С.М., Чуфицкий С.В., Perebeinos V.V., Gotin B.A. Fluorimetric analysis of the impact of coal sludge pollution on phytoplankton // Biophysics. 2020. Vol. 65, № 5. P. 850–857. DOI: 10.1134/S0006350920050024.
5. Беспалова С.В., Чуфицкий С.В., Романчук С.М., Кривякин А.С. Биомониторинг поверхностных вод в условиях антропогенной нагрузки на примере реки Кальмиус // Вестник Донецкого национального университета. Серия А: Естественные науки. 2018. № 3–4. С. 137–145.
6. Хазипова В.В., Мнускина Ю.В., Скочко А.В. Оценка техногенного воздействия на качество поверхност-

ных вод реки Кальмиус в районе полигона промышленных отходов // Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования. 2020. № 3 (7). С. 500–504.

7. Барциц Э.З. Особенности реализации принципов устойчивого развития в Донецкой Народной Республике // Modern Economy Success. 2021. № 4. С. 210–217.

8. Хахулина Н.Б., Дикоп В.Е., Кизин Д.В. О строительстве альтернативного источника водоснабжения (Большая вода) в ДНР // Вопросы управления недвижимостью, землеустройства и геодезии. 2023. № 1 (3). С. 61–65.

9. Maxwell K., Johnson G.N. Chlorophyll fluorescence – a practical guide // Journal of Experimental Botany. 2000. Vol. 51, iss. 345. P. 659–668. DOI: 10.1093/jxb/51.345.659.

10. Гольцев В.Н., Каладжи М.Х., Кузманова М.А., Аллахвердиев С.И. Переменная и замедленная флуоресценция хлорофилла *a* – теоретические основы и практическое приложение в исследовании растений. М.–Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2014. 220 с.

11. Истомин А.Н., Лялюк Н.М. Фитопланктон Волынецовского водохранилища // Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов: сб. докл. науч. конф. аспирантов и студентов (Донецк, 12–14 апреля 2011 г.). Т. 2. Донецк: ДонНТУ; ДонНУ, 2011. С. 24–25.

12. Каталог рек Украины / сост.: Г.И. Швец, Н.И. Дрозд, С.П. Левченко. Киев: Изд-во АН УССР, 1957. 192 с.

13. Гнатюк Н.Ю. К изучению флоры бассейна реки Крынки (бассейн реки Миус) // Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона. 2010. № 1 (10). С. 47–56.

14. О введении в действие ГН 2.1.5.1315-03: постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 30.04.2003 № 78 [Электронный ресурс] // Гарант.ру. <https://base.garant.ru/57427387>.

15. О введении в действие санитарных правил: постановление Главного государственного санитарного вра-

ча РФ от 26.09.2001 № 24 [Электронный ресурс] // Гарант.ру. <https://base.garant.ru/4177988>.

16. Сиротина М.В., Мурадова Л.В., Криницын И.Г., Семенова Г.А. Биоиндикация водных экосистем: учеб.-метод. пособие. Кострома: Костром. гос. ун-т, 2018. 224 с.

17. Вода. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла *a* (ГОСТ 17.1.4.02-90). М.: Издательство стандартов. 1990. 15 с.

18. Strasser R.J., Srivastava A., Tsimilli-Michael M. The fluorescence transient as a tool to characterize and screen photosynthetic samples // Probing Photosynthesis: Mechanism, Regulation and Adaptation. London, 2000. P. 445–483.

19. Новиков Д.А., Новочадов В.В. Статистические методы в медико-биологическом эксперименте. Волгоград: ВолГМУ, 2005. 84 с.

20. Метод комплексной оценки степени загрязненности вод по гидрохимическим показателям (РД 52.24.643.2002). Ростов-на-Дону, 2002. 55 с.

21. Беспалова С.В., Чуфицкий С.В., Романчук С.М., Саакян О.Н. Воздействие сточных вод угольных шахт на качество воды реки Ольховая // Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона. 2018. № 3–4. С. 152–159.

22. Сиделев С.И., Бабаназарова О.В. Анализ связей пигментных и структурных характеристик фитопланктона высокоэвтрофного озера // Журнал Сибирского федерального университета. Биология. 2008. № 2. С. 153–168.

23. Stirbet A., Lazar D., Kromdijk J., et al. Chlorophyll *a* fluorescence induction: Can just a one-second measurement be used to quantify abiotic stress responses? // Photosynthetica. 2018. № 56. P. 86–104. DOI: 10.1007/s11099-018-0770-3.

Статья публикуется в рамках госзадания 124012400344-1 «Разработка интеллектуальных систем анализа и прогнозирования состояния природно-технических объектов».

Информация об авторе(-ах):	Information about the author(-s):
Чуфицкий Сергей Викторович , старший преподаватель кафедры биофизики; Донецкий государственный университет (г. Донецк, Российская Федерация). E-mail: chufitsky@donnu.ru .	Chufitskiy Sergey Viktorovich , senior lecturer of Biophysics Department; Donetsk State University (Donetsk, Russian Federation). E-mail: chufitsky@donnu.ru .
Беспалова Светлана Владимировна , доктор биологических наук, профессор кафедры биофизики; Донецкий государственный университет (г. Донецк, Российская Федерация). E-mail: bespalova@donnu.ru .	Bespalova Svetlana Vladimirovna , doctor of biological sciences, professor of Biophysics Department; Donetsk State University (Donetsk, Russian Federation). E-mail: bespalova@donnu.ru .
Романчук Сергей Михайлович , кандидат технических наук, директор специального конструкторско-технологического бюро «Турбулентность»; Донецкий государственный университет (г. Донецк, Российская Федерация). E-mail: s.romanchuk@donnu.ru .	Romanchuk Sergey Mikhailovich , candidate of technical sciences, director of Special Design and Technology Bureau «Turbulence»; Donetsk State University (Donetsk, Russian Federation). E-mail: s.romanchuk@donnu.ru .

Для цитирования:

Чуфицкий С.В., Беспалова С.В., Романчук С.М. Биомониторинг состояния поверхностных вод Волынецовского водохранилища с применением метода флуориметрии // Самарский научный вестник. 2024. Т. 13, № 1. С. 67–74. DOI: 10.55355/snv2024131109.