

## ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД ПИТЬЕВОГО ВОДОХРАНИЛИЩА С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА БИОТЕСТИРОВАНИЯ НА КЛЕТКАХ ФИТОПЛАНКТОНА

© 2024

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

Донецкий государственный университет (г. Донецк, Российская Федерация)

**Аннотация.** В статье рассматриваются возможности применения методов регистрации световых и индукционных кривых флуоресценции хлорофилла тест-культуры *Chlorella vulgaris* при проведении биотестирования токсичности проб воды. Представлены результаты биотестирования проб воды из Волынцевского водохранилища и его основных притоков. Данные представлены за период активного использования ресурсов водохранилища, что привело к значительному снижению уровня воды и ухудшению качества водных ресурсов. Исследования показали наличие хронического токсического действия проб из водохранилища на исследуемый тест-объект. Фильтрат проб воды из северных притоков Волынцевского водохранилища оказывал стимулирующее действие на культуру фитопланктона. Методы флуориметрического анализа подтверждают результаты методики биотестирования, согласуются с изменением численности клеток и содержания хлорофилла в исследуемых пробах, а также позволяют выявить негативное воздействие на фотосинтетический аппарат *Chlorella vulgaris*, не вызывающее изменения параметров прироста тест-культуры. Выявлено негативное воздействие проб воды из основного притока водохранилища – реки Булавин – на скорость электронного транспорта и функционирование первичных акцепторов электронов фотосистемы II клеток *Chlorella vulgaris*. Полученные материалы могут быть полезны для исследователей, занимающихся проблемами биофизики первичных фотосинтетических реакций, экологическим мониторингом поверхностных природных вод и биотестированием.

**Ключевые слова:** биотестирование; флуориметрия; кривые индукции флуоресценции; световые кривые флуоресценции; хлорофилл; *Chlorella vulgaris*; Волынцевское водохранилище; река Булавин.

## ASSESSMENT OF THE QUALITY OF SURFACE WATERS OF A DRINKING RESERVOIR USING THE METHOD OF BIOTESTING ON PHYTOPLANKTON CELLS

© 2024

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

Donetsk State University (Donetsk, Russian Federation)

**Abstract.** The article discusses the possibilities of using methods for recording light and induction curves of chlorophyll fluorescence of test-culture *Chlorella vulgaris* in biotesting of water samples. The results of biotesting of water samples from the Volyntsevo reservoir and its main tributaries are presented. The data are presented for the period of active use of reservoir resources, which led to a significant decrease in water levels and deterioration in the quality of water resources. Studies have shown the presence of chronic toxic effects of samples from the reservoir on the test object under study. The filtrate of water samples from the northern tributaries of the Volyntsevo reservoir had a stimulating effect on phytoplankton culture. The methods of fluorimetric analysis confirm the results of the biotesting technique, are consistent with changes in the number of cells and the content of chlorophyll in the samples, and also reveal a negative effect on the photosynthetic apparatus of *Chlorella vulgaris*, which does not cause changes in the parameters of the growth of the test culture. The negative impact of water samples from the main tributary of the reservoir, the Bulavin River, on the speed of electronic transport and the functioning of primary electron acceptors of photosystem II of *Chlorella vulgaris* cells was revealed. The obtained materials can be useful for researchers dealing with the problems of biophysics of primary photosynthetic reactions, environmental monitoring of surface natural waters and biotesting.

**Keywords:** biotesting; fluorimetry; fluorescence induction curves; fluorescence light curves; chlorophyll; *Chlorella vulgaris*; Volyntsevo reservoir; Bulavin River.

### Введение

Оценка состояния водных объектов неразрывно сопряжена с изучением физико-химического состава проб воды с дальнейшим выявлением основных загрязнителей. Однако определение полного перечня загрязнителей весьма затруднительно по целому ряду причин. Одним из решений данной проблемы является использование методов биотестирования. Необходимость проведения оценки степени загрязнения окружающей среды по изменению состояния организма-индикатора отмечена в целом ряде работ [1–3]. В данном направлении наряду с поиском тест-объектов, обладающих специфической чувствительностью к отдельным загрязнителям, производится разработка ме-

тодов биотестирования, обеспечивающих большую информативность о состоянии исследуемого организма [4]. При оценке загрязнения водной среды в качестве тест-объектов наиболее часто используют культуры микроводорослей (*Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus quadricauda* и т.д. [5; 6]) и зоопланктона (*Daphnia magna*, *Ceriodaphnia affinis* и т.д. [7; 8]). При биотестировании на клетках фитопланктона, как правило, учитывается скорость прироста численности и концентрация хлорофилла в исследуемых пробах [9]. Внедрение флуориметрических методов анализа не только позволяет оценить количественные показатели тест-культуры, но также отражает протекание первичных фотосинтетических процессов, которые го-

раздо более чувствительны к изменению условий окружающей среды [10–12]. Регистрация флуоресценции хлорофилла является неинвазивным, не требующим тщательной пробоподготовки, информативным методом [13; 14], который применим для природных поверхностных вод, подверженных различной степени загрязнения [15; 16]. Как следствие, токсическое действие загрязнителей может быть выявлено на более ранних этапах исследования.

Таким образом, целью работы являлось проведение биотестирования токсичности проб воды на культуре клеток *Chlorella vulgaris* с применением методов флуориметрического анализа.

#### Материалы и методика исследований

Оценку токсичности поверхностных вод исследуемого водохранилища производили с учетом всех крупных притоков, включая основной – р. Булавин (рис. 1). Точки отбора проб располагались на русле реки Булавин до впадения в водохранилище (точки 1 и 3) и после него (точка 7). К числу притоков Волынецовского водохранилища относятся балки Хацапетовская и Еленовская (точки 4 и 5 соответственно), а также балка Должик, впадающая в реку Булавин непосредственно перед вхождением в водохранилище (точка 2).

Перед выполнением биотестирования из проб воды получали фильтрат путем предварительного пропускания через ацетилцеллюлозные мембранные фильтры типа МФАС-ОС-4 фирмы «Владипор» с диаметром пор 0,6 мкм с целью удаления зоопланктона и клеток природного фитопланктона.

При оценке токсичности проб воды за основу были взяты рекомендации Р 52.24.808-2014 [9]. В отличие от предложенных рекомендаций, вместо спектрофотометрического определения содержания хлорофилла *a* в исследуемых пробах, выполняли флуориметрическое определение содержания фотопигмента, а также регистрировали кривые индукции флуоресценции и световые кривые флуоресценции хлорофилла с целью более точного определения состояния тест-культуры фитопланктона не только на основании количественных показателей роста, но и по фотосинтетической активности клеток фитопланктона. В качестве тест-объекта использовали культуру зеленых микроводорослей *Chlorella vulgaris*. Токсичность проб выявляли при непрерывном биотестировании. О степени токсичности проб воды судили по изменению указанных показателей тест-культуры в зависимости от длительности экспозиции. Если коэффициенты прироста количества хлорофилла и численности клеток *Chlorella vulgaris* отклонялись от контрольных значений, констатировали токсическое действие фильтрата из исследуемой мониторинговой точки [9]. Если отклонение показателей прироста тест-культуры происходило спустя 24 часа культивирования, токсическое действие фильтрата считали острым, если спустя 96 часов – хроническим.

Для контрольных тест-культур вместо фильтрата из исследуемых экспериментальных проб использовали дистиллированную воду. Культивирование контрольных и экспериментальных проб проводили совместно, в одинаковых условиях: при температуре  $+20 \pm 2^\circ\text{C}$  и освещении от 2000 до 3000 лк со световым режимом 12/12 часов. Перед экспериментом проверяли чувствительность культуры микроводорослей

воздействием эталонного токсиканта – калия двухромовокислого [9].

Подсчет численности клеток фитопланктона выполняли в камере Горяева. Флуориметрический анализ проб воды проводился с помощью флуориметров Phyto-PAM (Walz, Германия) и ФС-2 (СКТБ «Турбулентность» ДонГУ). Световые кривые регистрировали на основании встроенного протокола измерений для Phyto-PAM с постепенным (каждые 10 секунд) повышением интенсивности действующего света (далее ФАР – фотосинтетически активная радиация) от 32 до 768 мкмоль фотон  $\text{м}^{-2} \text{с}^{-1}$ , оценивая изменение квантового выхода флуоресценции ( $F_v/F_m$ ) и скорости электронного транспорта (ETR). Анализ индукционных кривых выполняли на основании ОЖР-теста [17, с. 85–95; 18, р. 452–453] с помощью программы PyPhotoSyn [19]. Достоверность отличий средних значений полученных данных определяли с использованием критерия Вилкоксона [20, с. 54–57].

#### Результаты исследований и их обсуждение

##### Оценка содержания хлорофилла и скорости роста тест-культуры *Chlorella vulgaris*

Согласно результатам биотестирования, острого токсического действия фильтрата проб воды на культуру фитопланктона не выявлено (табл. 1). После 24 часов экспозиции для фильтрата из мониторинговых проб 2 и 6 были получены отклонения в численности клеток от контрольных значений, превышающие границу в 25%, однако прирост хлорофилла в данных пробах не выходил за границы нормы. Для мониторинговых точек 2 и 3 не удалось получить статистически значимое отличие от контроля.

После 96 часов экспозиции хроническое токсическое действие было выявлено для Волынецовского водохранилища. Показатели прироста культуры *Chlorella vulgaris* снижались на 81% (по численности) и 92% (по приросту хлорофилла) относительно контроля (табл. 1). Также интенсивное угнетающее действие оказывали пробы воды из балки Должик (точка 2) и р. Булавин (точка 7), для которых были получены достоверные отклонения от контрольных значений. Коэффициент прироста хлорофилла отличался от контроля менее чем на 50%, что не позволяет установить хроническое токсическое действие данных проб. Стимулирующее рост культуры действие оказывал фильтрат из балок Хацапетовская и Еленовская (точки 4 и 5, соответственно), а также на участке р. Булавин до водохранилища (точка 1). Такой эффект можно объяснить высоким содержанием биогенных веществ, в частности нитратов, в данных мониторинговых точках.

Таким образом, выявлено хроническое токсическое действие фильтрата водохранилища на тест-культуру *Chlorella vulgaris*. Кроме того, выявлен ряд мониторинговых точек, оказывающих стимулирующее рост культуры действие – точки 2, 5 и 4, а также снижающее интенсивность ростовых процессов – точки 2 и 7, для которых токсическое действие согласно стандартной методике биотестирования выявить не удалось. Для определения состояния клеток тест-культуры использовали метод флуориметрии, как инструмент для оценки фотосинтетической активности микроводорослей и определения функционального состояния фотосистемы II.



**Рисунок 1** – Мониторинговые точки Волынцевского водохранилища и его притоков

*Регистрация световых кривых  
флуоресценции тест-культуры  
Chlorella vulgaris*

После 24 часов экспозиции достоверных отличий от контрольных значений не выявлено как для квантового выхода, так и для скорости электронного транспорта (рис. 2: А и Б).

После 96 часов биотестирования наблюдали снижение максимальной скорости электронного транспорта для проб из мониторинговых точек 2 и 3 (см. рис. 3: Б). При низких интенсивностях действующего света показатели ETR соответствовали контрольным значениям тест-культуры. При повышении интенсивности ФАР до 664 мкмоль квант/м<sup>2</sup>с наблюдали снижение данного параметра для проб из балки Должик и р. Булавин (точка 3). Для данных проб также наблюдали снижение квантового выхода, которое проявлялось при ФАР 464 мкмоль квант/м<sup>2</sup>с и выше (см. рис. 3: А).

Фильтрат из низовья водохранилища оказывал выраженное угнетающее действие на клетки тест-культуры (рис. 3: А и Б). Квантовый выход флуоресценции клеток колебался в пределах около 0,3–0,1 ед., а максимальная скорость электронного транспорта составляла не более 60 отн. ед., что в два раза ниже контрольных значений. На фоне снижения общей численности клеток для данной пробы (табл. 1) происходило значительное снижение фотосинтетической активности тест-культуры.

Метод регистрации световых кривых позволяет выполнить первичный анализ фотосинтетической активности клеток фитопланктона, а также дает возможность оценить изменения в процессах светоадаптации тест-культуры. На основании квантового выхода и ETR можно судить о различиях между эффектами, оказываемыми фильтратом из разных мониторинговых точек. При этом негативное воздействие

фильтрата наблюдали не только для мониторинговой точки 6, оказывающего хроническое токсическое действие согласно методике [9], но и для других проб. Больше информации об изменениях в фотосинтетическом аппарате клеток способен дать ОЛР-тест.

*Регистрация кривых индукции  
флуоресценции хлорофилла тест-культуры  
Chlorella vulgaris*

На рисунке 4 приведены некоторые параметры ОЛР-теста тест-культуры *Chlorella vulgaris* после 24 и 96 часов экспозиции. Все представленные результаты нормированы на контрольные значения.

Для тест-культуры фильтрата Волынцевского водохранилища были характерны более низкие интенсивности флуоресценции (рис. 4: А). Согласно результатом стандартной методики биотестирования для данной пробы происходило наибольшее замедление скорости прироста численности тест-культуры (табл. 1), что объясняет более низкие значения интенсивности флуоресценции. Также значимые отличия уровня  $F_m$  были выявлены для мониторинговой точки 3.

Параметры, отражающие эффективность функционирования фотосинтетического аппарата ( $F_v/F_m$ ,  $PI$ ), на данном этапе исследования были неинформативны (рис. 4: А). Достоверные отличия индекса  $PI$  от контроля были получены только для мониторинговой точки 6.

Для всех проб наблюдали возрастание параметра  $Area$ . Однако по изменению лишь одного параметра трудно судить о конкретных изменениях в фотосистеме II. Как правило, изменения  $Area$  сопряжены с параметром  $S_m$ , отражающим емкость пула электронных акцепторов [17, с. 90–91]. Достоверных отличий от контроля для  $S_m$  выявлено не было.

Таким образом, несмотря на отсутствие острого токсического действия для фильтрата из мониторин-

говых точек 3 и 6, наблюдали снижение интенсивности флуоресценции хлорофилла, а также характерное для всех исследуемых проб возрастание параметра *Area*.

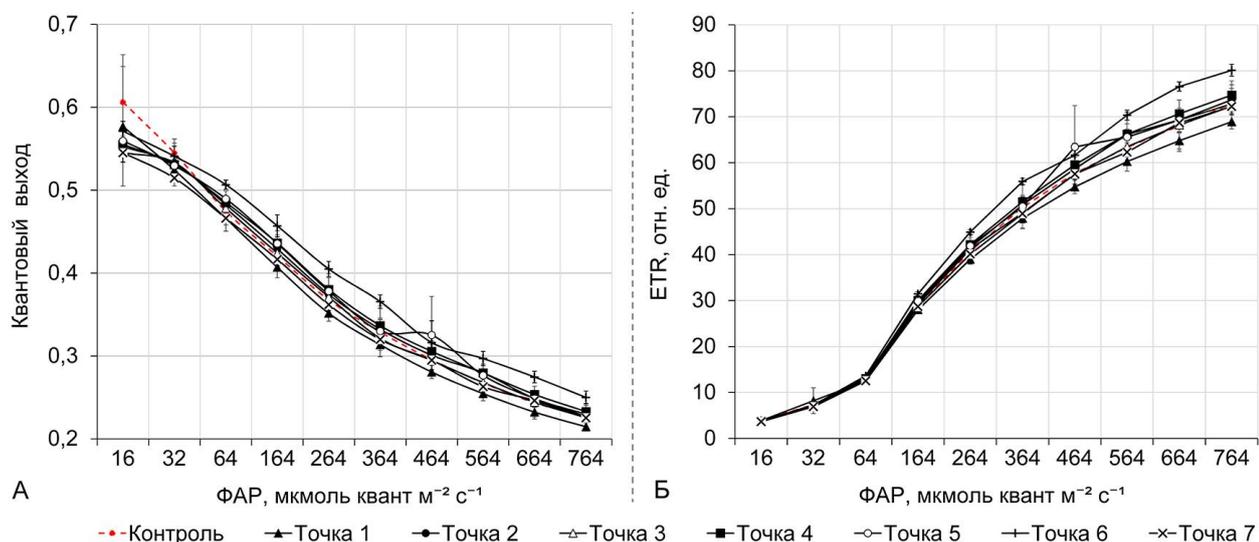
После 96 часов экспозиции наблюдали значимые отклонения уровней минимальной ( $F_0$ ) и максимальной ( $F_m$ ) флуоресценции от контроля для всех мониторинговых точек, кроме точки 5 (рис. 4: Б). Снижение интенсивности флуоресценции было характерно для проб из балки Должник (точка 2), Волынцевского водохранилища (точка 6) и р. Булавин (точка 7). Значения интенсивности флуоресценции для монито-

ринговой точки 6 были значительно ниже контроля, снижение параметров  $F_0$  и  $F_m$  (рис. 4: Б) сопоставимо со снижением численности клеток тест-культуры и содержанием хлорофилла (табл. 1). К повышению показателей  $F_0$  и  $F_m$  приводило воздействие фильтрата из мониторинговых точек 1, 3 и 4. Коэффициент прироста численности и концентрации хлорофилла для данных проб был также выше контрольных значений (табл. 1). Причиной интенсификации прироста и флуоресценции клеток тест-культуры может служить присутствие более высоких, в сравнении с другими пробами, концентраций нитрат-ионов.

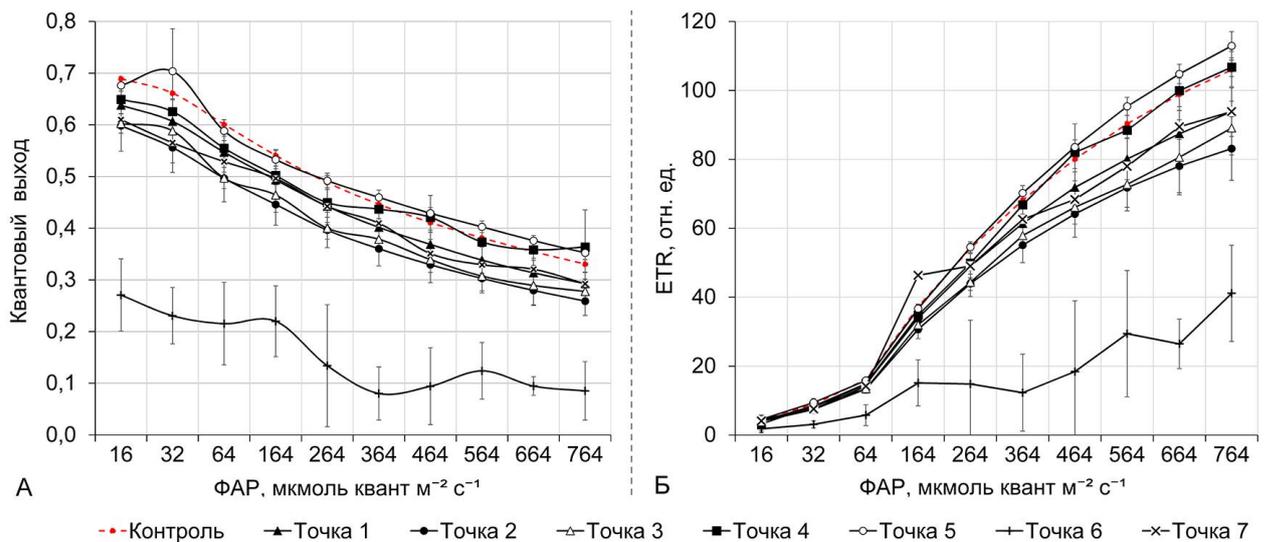
**Таблица 1** – Результаты биотестирования токсичности проб воды на культуре *Chlorella vulgaris*

Экспозиция	Исследуемые пробы	Количество клеток, отклонение от контроля, %	Концентрация хлорофилла <i>a</i> , отклонение от контроля, %	Токсическое действие
24 ч.	Контроль	–	–	–
	Точка 1	–16,9	4,8*	нет ОТД
	Точка 2	–37,5	1,9	нет ОТД
	Точка 3	–8,1	1,6	нет ОТД
	Точка 4	–0,9	4,5*	нет ОТД
	Точка 5	–17,5*	2,6	нет ОТД
	Точка 6	–45,1*	–6,6*	нет ОТД
	Точка 7	–20,5	9,3*	нет ОТД
96 ч.	Контроль	–	–	–
	Точка 1	13,9*	29,3*	нет ХТД
	Точка 2	–66,6*	–26,6*	нет ХТД
	Точка 3	–4,3	17,1*	нет ХТД
	Точка 4	17,3	38,7*	нет ХТД
	Точка 5	68,0*	15,4*	нет ХТД
	Точка 6	–81,0*	–92,0*	ХТД
	Точка 7	–37,5*	–29,7*	нет ХТД

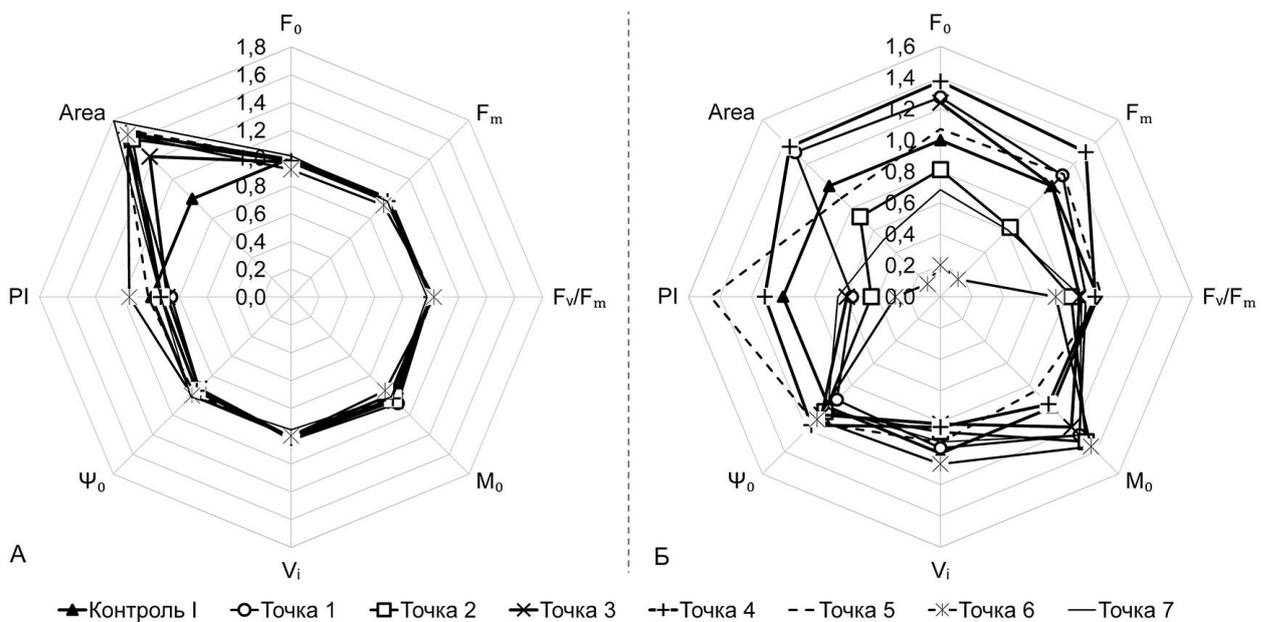
Примечание. \* – отличия от контроля достоверны согласно критерию Вилкоксона при  $\alpha = 0,05$ ; полужирным выделены превышения степени отклонения от контроля.



**Рисунок 2** – Световые кривые квантового выхода флуоресценции хлорофилла *a* (А) и скорости электронного транспорта – ETR (Б) после 24 часов экспозиции



**Рисунок 3** – Световые кривые квантового выхода флуоресценции хлорофилла *a* (А) и скорости электронного транспорта – ETR (Б) после 96 часов экспозиции



**Рисунок 4** – Некоторые параметры OJIP-теста для тест-культуры *Chlorella vulgaris* после 24 часов (А) и 96 часов (Б) экспозиции

Значения параметра *Area* изменялись в соответствии с уровнями флуоресценции. Для проб с низкой интенсивностью флуоресценции и площадью над кривой индукции получены высокие значения максимальной скорости восстановления первичного хинонного акцептора  $Q_a$  (параметр  $M_0$ ). Однако вероятность транспорта электронов за пределы  $Q_a$  была выше только для мониторинговых точек 4, 5 и 6 (параметр  $\Psi_0$ ). Параметры  $M_0$  и  $\Psi_0$  отражают функционирование электрон-транспортной цепи на участке до и после  $Q_a$  и, следовательно, должны изменяться согласованно.

Для клеток тест-культуры, выращенных на фильтрате из водохранилища, балки Должик и р. Булавин (точки 1, 3 и 7), было характерно снижение показате-

телей эффективности функционирования фотосинтетического аппарата. Низкие значения общего фотосинтетического индекса производительности было получено для фильтрата воды из водохранилища – индекс  $PI$  был ниже контрольных значений в 5 раз. Согласно с индексом  $PI$  происходило изменение квантового выхода флуоресценции (рис. 4: Б).

Отдельно стоит выделить стимулирующее действие фильтрата воды из балок Хацапетовская и Еленовская. Для данных проб были получены наиболее высокие показатели как интенсивности флуоресценции, так и параметров эффективности функционирования фотосинтетического аппарата фитопланктона ( $PI$  и  $F_v/F_m$ ). Согласно всем методам исследования в мониторинговой точке 4 были наиболее благоприят-

ные условия для развития фитопланктона. Это отражалось как на численности и видовом разнообразии природной альгофлоры, так и на показателях прироста и флуоресценции тест-культуры *Chlorella vulgaris*.

На основании анализа кривых индукции флуоресценции хлорофилла при биотестировании было установлено негативное воздействие фильтрата из Волынецовского водохранилища, р. Булавин и балки Должик, а также стимулирующее действие фильтрата из северных притоков водохранилища.

#### Заключение

При оценке изменения содержания хлорофилла и скорости прироста численности тест-культуры *Chlorella vulgaris*, после 96 часов экспозиции, установлено токсическое действие фильтрата воды из Волынецовского водохранилища. Метод регистрации световых кривых флуоресценции дополняет стандартную методику, подтверждая негативное воздействие фильтрата из точки 6 на клетки фитопланктона, а также выявляя негативное воздействие фильтрата из балки Должик и р. Булавин на скорость электронного транспорта и квантовый выход клеток тест-культуры.

При оценке параметров кривых индукции флуоресценции было подтверждено негативное воздействие проб воды из Волынецовского водохранилища, балки Должик и р. Булавин, а также были получены данные о стимулирующем фотосинтетическую активность воздействии фильтрата из северных притоков водохранилища (точки 4 и 5). Наибольшие изменения в работе фотосистемы II клеток *Chlorella vulgaris* происходило на участке первичного хинона  $Q_a$ , что выражалось в изменении максимальной скорости его восстановления и снижении вероятности транспорта электронов к вторичному хинону.

При биотестировании проб воды было установлено токсическое действие на тест-культуру. Но при этом также были получены результаты, указывающие на негативное воздействие на физиологическое состояние фитопланктона проб воды, для которых не было установлено достоверного токсического действия. Таким образом, результаты флуориметрических методик регистрации световых и индукционных кривых флуоресценции хлорофилла согласуются с результатами рекомендуемой методики биотестирования, но кроме того дают возможность получить более полное представление о состоянии тест-объекта, описывая изменения в функциональном состоянии фотосинтетического аппарата и эффективности его функционирования.

#### Список литературы:

1. Никаноров А.М., Трунов Н.М. Внутриводоемные процессы и контроль качества природных вод: монография / под ред. А.И. Бедрицкого. СПб.: Гидрометеоздат, 1999. 156 с.
2. Филенко О.Ф., Чуйко Г.М. Водная экотоксикология в России: от прошлого к настоящему // Труды Института биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН. 2017. Вып. 77 (80). С. 124–142. DOI: 10.24411/0320-3557-2017-10008.
3. Терехова В.А. Некоторые научно-организационные проблемы «Global Indicator Networks» // Теоретическая и прикладная экология. 2009. № 3. С. 20–22.

4. Олькова А.С. Разработка стратегии биотестирования водных сред с учетом многофакторности ответных реакций тест-организмов: дис. ... д-ра биол. наук: 03.02.08. Киров, 2020. 359 с.

5. Тютюкова Е.А., Григорьев Ю.С. Чувствительность биотестов на основе водорослей хлорелла и сценедесмус к тяжёлым металлам // Теоретическая и прикладная экология. 2014. № 2. С. 57–60. DOI: 10.25750/1995-4301-2014-2-057-060.

6. Польшов В.А., Максимова Е.Н., Богданов А.В., Цырендилькова Л.Б. Оценка чувствительности стандартизированных альгобиотестов на основе зелёных водорослей к действию «модельного» токсиканта // Вода: химия и экология. 2024. № 4. С. 70–77.

7. Олькова А.С. Процедура выбора методов биотестирования в условиях разных видов загрязнения // Трансформация экосистем. 2022. Т. 5, № 3 (17). С. 63–75. DOI: 10.23859/estr-220324.

8. Гончарук В.В., Зуй О.В., Мельник Л.А., Мишук Н.А., Наниева А.В., Пелишенко А.В. Оценка физиологической полноценности питьевой воды методом биотестирования // Химия в интересах устойчивого развития. 2021. Т. 29, № 1. С. 35–41. DOI: 10.15372/khur2021275.

9. Р 52.24.808-2014. Оценка токсичности поверхностных вод суши методом биотестирования с использованием хлорофилла *a*. Ростов-на-Дону, 2014. 23 с.

10. Сорокина Г.А., Шашкова Т.Л., Субботин М.А., Стравинскене Е.С., Григорьев Ю.С. Флуоресценция хлорофилла в оценке воздействия соединений тяжёлых металлов на водные организмы // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Биология. Экология. 2021. Т. 36. С. 24–36. DOI: 10.26516/2073-3372.2021.36.24.

11. Маторин Д.Н., Яковлева О.В., Тодоренко Д.А., Горячев С.Н., Алексеев А.А. Использование замедленной флуоресценции хлорофилла водорослей для биотестирования загрязнений // Актуальные вопросы биологической физики и химии. 2022. Т. 7, № 2. С. 339–342. DOI: 10.29039/rusjbc.2022.0525.

12. Протопопов Ф.Ф., Тодоренко Д.А., Николаев И.Н., Алексеев А.А., Братковская Л.Б., Маторин Д.Н. Флуоресценция хлорофилла фитопланктона реки Москва при воздействии ионов ртути // Биофизика. 2021. Т. 66, № 5. С. 917–924. DOI: 10.31857/s0006302921050094.

13. 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.

14. 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 (1). P. 86–104. DOI: 10.1007/s11099-018-0770-3.

15. Беспалова С.В., Романчук С.М., Чуфицкий С.В., Перебеинов В.В., Готин В.А. Флуориметрический анализ воздействия загрязнения ила на фитопланктон // Биопластика. 2020. Vol. 65, № 5. P. 850–857. DOI: 10.1134/s0006350920050024.

16. Кузнецова А.В., Винокуров И.Ю., Погосян С.И. Применение флуориметрического метода для биоиндикации качества вод // Вода: химия и экология. 2011. № 3 (33). С. 58–65.

17. 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.

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. Antal T., Konyukhov I., Volgusheva A., Plyusnina T., Khruschev S., Kukarskikh G., Goryachev S., Rubin A. Chlorophyll fluorescence induction and relaxation system for the continuous monitoring of photosynthetic capacity in photobioreactors // Physiologia Plantarum. 2018. Vol. 165, iss. 3. P. 476–486. DOI: 10.1111/pp1.12693.

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

*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):
<p><b>Чуфицкий Сергей Викторович</b>, старший преподаватель кафедры биофизики; Донецкий государственный университет (г. Донецк, Российская Федерация). E-mail: chufitsky@donnu.ru.</p> <p><b>Беспалова Светлана Владимировна</b>, доктор физико-математических наук, профессор, ректор; Донецкий государственный университет (г. Донецк, Российская Федерация). E-mail: bespalova@donnu.ru.</p> <p><b>Романчук Сергей Михайлович</b>, кандидат технических наук, директор специального конструкторско-технологического бюро «Турбулентность»; Донецкий государственный университет (г. Донецк, Российская Федерация). E-mail: s.romanchuk@donnu.ru.</p>	<p><b>Chufitskiy Sergey Viktorovich</b>, senior lecturer of Biophysics Department; Donetsk State University (Donetsk, Russian Federation). E-mail: chufitsky@donnu.ru.</p> <p><b>Bespalova Svetlana Vladimirovna</b>, doctor of physical and mathematical sciences, professor, rector; Donetsk State University (Donetsk, Russian Federation). E-mail: bespalova@donnu.ru.</p> <p><b>Romanchuk Sergey Mikhailovich</b>, candidate of technical sciences, director of Special Design and Technology Bureau «Turbulence»; Donetsk State University (Donetsk, Russian Federation). E-mail: s.romanchuk@donnu.ru.</p>

**Для цитирования:**

Чуфицкий С.В., Беспалова С.В., Романчук С.М. Оценка качества поверхностных вод питьевого водохранилища с применением метода биотестирования на клетках фитопланктона // Самарский научный вестник. 2024. Т. 13, № 3. С. 65–71. DOI: 10.55355/snv2024133110.