

УДК [(535-31:581.526.325): 581.132] (28)

*П. Д. Клоченко, А. В. Курейшевич, О. А. Сосновская,
А. В. Калиновская*

**ВЛИЯНИЕ УФ-ИЗЛУЧЕНИЯ НА СОДЕРЖАНИЕ
ХЛОРОФИЛЛА *a* И ИНТЕНСИВНОСТЬ
ФОТОСИНТЕЗА ФИТОПЛАНКТОНА
РАЗНОТИПНЫХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ**

Представлены результаты работ по изучению влияния ультрафиолетового излучения на содержание хлорофилла *a*, потенциальную фотосинтетическую активность и интенсивность продуцирования кислорода фитопланктоном из разнотипных водных объектов. Выявлены закономерности реакции пресноводных планктонных водорослей на воздействие исследуемого стрессового фактора.

Ключевые слова: *УФ-излучение, фитопланктон, хлорофилл, фотосинтез.*

Усиленное воздействие многих экологических факторов на гидроэкосистемы приводит к нарушению физиолого-биохимических процессов в клетках водорослей. Следствием этого являются изменения количественных показателей и качественного состава альгосообществ.

Среди абиотических факторов солнечное излучение является одним из наиболее важных для поддержания жизнедеятельности как наземных, так и водных растений, в том числе водорослей. Фотосинтетическая продуктивность последних в значительной степени зависит от спектрального состава солнечного света, который характеризуется наличием ультрафиолетового (200—400 нм), видимого (400—800 нм) и инфракрасного (> 800 нм) диапазонов [6, 9].

В последнее время загрязнение атмосферы промышленными выбросами приводит к уменьшению озонового слоя — природного фильтра, задерживающего УФ-лучи [1]. Дальнейшие глобальные изменения климата приведут к увеличению количества падающей на Землю УФ-радиации и могут в значительной степени отразиться на жизнедеятельности организмов, в том числе микроводорослей — первичных продуцентов водных экосистем.

© Клоченко П. Д., Курейшевич А. В., Сосновская О. А., Калиновская А. В., 2010

Ультрафиолетовую составляющую солнечного излучения делят на три диапазона: УФ-А (315—400 нм), УФ-В (280—315 нм) и УФ-С (ниже 280 нм). УФ-В обладает большей биологической активностью, чем УФ-А [5]. УФ-С полностью задерживается верхними слоями атмосферы. В то же время в условиях ее загрязнения доля коротковолнового УФ-излучения резко возрастает [12]. Согласно данным некоторых исследователей, от 30 до 60% потока УФ-А и УФ-В, падающего на поверхность воды, проникает на глубину до 5 м [5].

Литературные сведения о влиянии УФ-излучения на водоросли неоднозначны. В частности известно, что оно может положительно воздействовать на развитие и фотосинтез некоторых зеленых и синезеленых водорослей, а также на азотфиксацию [2, 4]. В то же время имеются данные о том, что УФ-излучение ингибирует функциональную активность планктонных водорослей (влияет на движение и ориентацию клеток, подавляет рост, фотосинтез, фиксацию азота), однако они касаются в основном морских видов [3, 6, 13—16].

Целью настоящей работы являлось установление особенностей влияния УФ-излучения на фотосинтетическую активность сообществ пресноводных планктонных водорослей, развивающихся в разнотипных водных объектах.

Материал и методика исследований. Опыты проводили в летнее время с фитопланктоном зал. Оболонь (Каневское водохранилище), озер г. Киева — Центрального (пойменный водоем) и Вербного (озеро-старица на месте бывшего русла реки Почайны), а также р. Десны. Отобранную воду экспонировали в течение 5—6 сут в стеклянных сосудах при естественном освещении. Облучение образцов УФ-светом в режиме 1, 5 и 10 мин осуществляли в начале опыта и через сутки. Контролем служили необлученные образцы. Источником УФ-излучения служила ртутная лампа (ДРТ) мощностью 125 Вт/м² с полным УФ-спектром. Содержание хлорофилла *a* и потенциальную фотосинтетическую активность водорослей определяли с помощью флуориметра разработки Красноярского университета Planctofluorometer FL 3003M [10]. Коэффициент потенциальной фотосинтетической активности фитопланктона (K_f) оценивали на основании измерения вариабельной флуоресценции хлорофилла до (F_0) и после (F_m) добавления в исследуемую пробу воды ингибитора транспорта электронов — симазина [10]:

$$K_f = \frac{F_m - F_0}{F_m}$$

Интенсивность фотосинтеза планктонных водорослей и деструкции органического вещества определяли скляночным методом в кислородной модификации [7] через сутки после начала опыта. Молибденовые склянки с фитопланктоном экспонировали в течение 3 ч (с 10.00 до 13.00) под открытым небом в природной воде на глубине 10 см. Количество кислорода в водной среде определяли йодометрическим методом (по Винклеру) [8]. Пробы фитопланктона отбирали и обрабатывали по общепринятой методике [11].

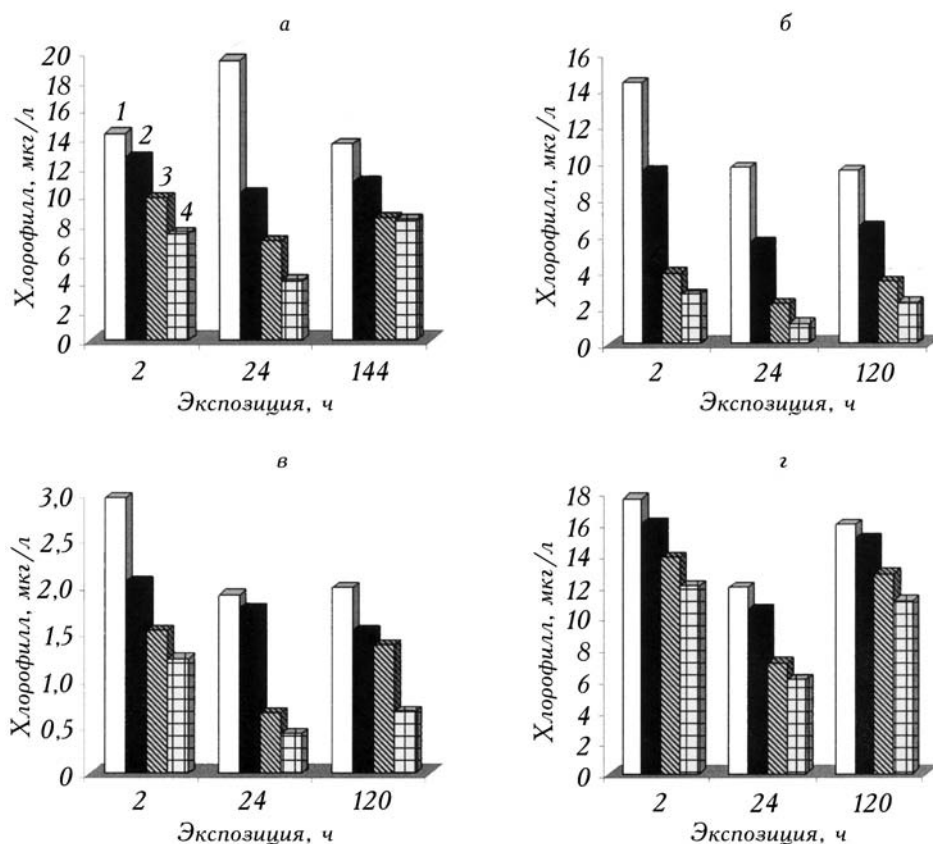
Результаты исследований и их обсуждение

В образцах фитопланктона зал. Оболонь Каневского водохранилища по численности доминировали Bacillariophyta (49,7%) и Chlorophyta (37,0%), по биомассе — Dinophyta (58,7%) и Bacillariophyta (35,7%). Основу численности фитопланктона оз. Центрального составляли Chlorophyta (53,8%), Cyanophyta (24,1%) и Streptophyta (18,9%), а биомассы — Streptophyta (41,0%), Dinophyta (32,6%) и Chlorophyta (23,3%). В оз. Вербном по численности доминировали Cyanophyta (74,6%) и Chlorophyta (22,6%), по биомассе — Euglenophyta (33,8%) и Chlorophyta (33,2%). В р. Десне основу численности составляли Cyanophyta (61,0%) и Chlorophyta (36,5%), а биомассы — Chlorophyta (40,9%) и Euglenophyta (24,9%).

Изучение воздействия ультрафиолетового излучения на фитопланктон показало, что оно в значительной степени влияет на содержание хлорофилла *a*. Уже через 2 ч после облучения образцов планктонных водорослей из различных водных объектов регистрировалось заметное уменьшение концентрации основного фотосинтетического пигмента, которое было наиболее существенным при 10-минутном воздействии УФ-излучения (рис. 1). Следует отметить, что наиболее резкое уменьшение содержания хлорофилла *a* происходило в вариантах опыта с фитопланктоном оз. Центрального, где концентрация хлорофилла уменьшалась по сравнению с контрольным вариантом в 5,3 раза.

Негативное воздействие УФ-излучения на функционирование фитопланктона проявлялось и через 24 ч после начала эксперимента. Изменения содержания хлорофилла *a* в опытных вариантах были более существенными, чем в контроле (см. рис. 1). Так, в частности, концентрация хлорофилла *a* при облучении образцов фитопланктона зал. Оболонь УФ-светом в течение 1 мин уменьшалась по сравнению с контролем в 1,9 раза, при 5 мин — в 2,8 раза и при 10 мин — в 4,7 раза. Наиболее четко подобная тенденция проявилась в опытах с фитопланктоном оз. Центрального. Здесь на следующие сутки после начала опыта содержание хлорофилла *a* резко снижалось в вариантах при облучении образцов планктонных водорослей в течение 5 и 10 мин (соответственно в 4,4 и 8,7 раза), тогда как при воздействии УФ-излучения на протяжении 1 мин это уменьшение было менее существенным (в 1,7 раза). Для фитопланктона оз. Вербного отмечалась схожая картина: небольшое (в 1,1 раза) снижение количества хлорофилла *a* по сравнению с контролем в варианте при 1-минутном облучении образцов водорослей и резкое уменьшение (соответственно в 2,9 и 4,5 раза) при воздействии УФ-излучения в течение 5 и 10 мин. Что касается речного фитопланктона, то здесь зарегистрированы наименее существенные изменения содержания хлорофилла *a* в опытных вариантах по сравнению с контролем: при 1-минутном воздействии УФ-излучения на клетки водорослей количество хлорофилла *a* уменьшалось по сравнению с контролем в 1,1 раза, при 5-минутном — в 1,7 и при 10-минутном — в 2,0 раза.

На 6-е сутки эксперимента с фитопланктоном зал. Оболонь, после снятия стрессового фактора содержание хлорофилла *a* в опытных сосудах



1. Изменение содержания хлорофилла *a* фитопланктона разнотипных водных объектов под влиянием УФ-излучения. Здесь и на рис. 2—4: *a* — зал. Оболонь; *б* — оз. Центральное; *в* — оз. Вербное; *г* — р. Десна; 1 — контроль; 2, 3, 4 — продолжительность облучения образцов — соответственно 1, 5 и 10 мин.

вновь возросло, хотя и оставалось ниже контрольных значений. Такая тенденция наблюдалась и в экспериментах с фитопланктоном озер Вербного и Центрального, а также р. Десны (см. рис. 1). При этом необходимо обратить внимание на тот факт, что наиболее существенно количество хлорофилла *a* к концу эксперимента (на 6-е сутки) возросло в опытных сосудах с фитопланктоном р. Десны, а наименее — в сосудах с фитопланктоном озер Центрального и Вербного. Важно подчеркнуть и то обстоятельство, что во всех вариантах опытов сохранялась обратная зависимость содержания хлорофилла *a* от продолжительности облучения.

Причиной возрастания концентрации хлорофилла *a* в опытных сосудах после прекращения облучения микроводорослей УФ-светом явилось усиление развития в альгосообществах зал. Оболонь и оз. Центрального зеленых водорослей, которые стали доминантами как по численности, так и по биомассе. В опытных вариантах с фитопланктоном р. Десны также существенно усилилась роль зеленых водорослей, занявших доминирующее положение

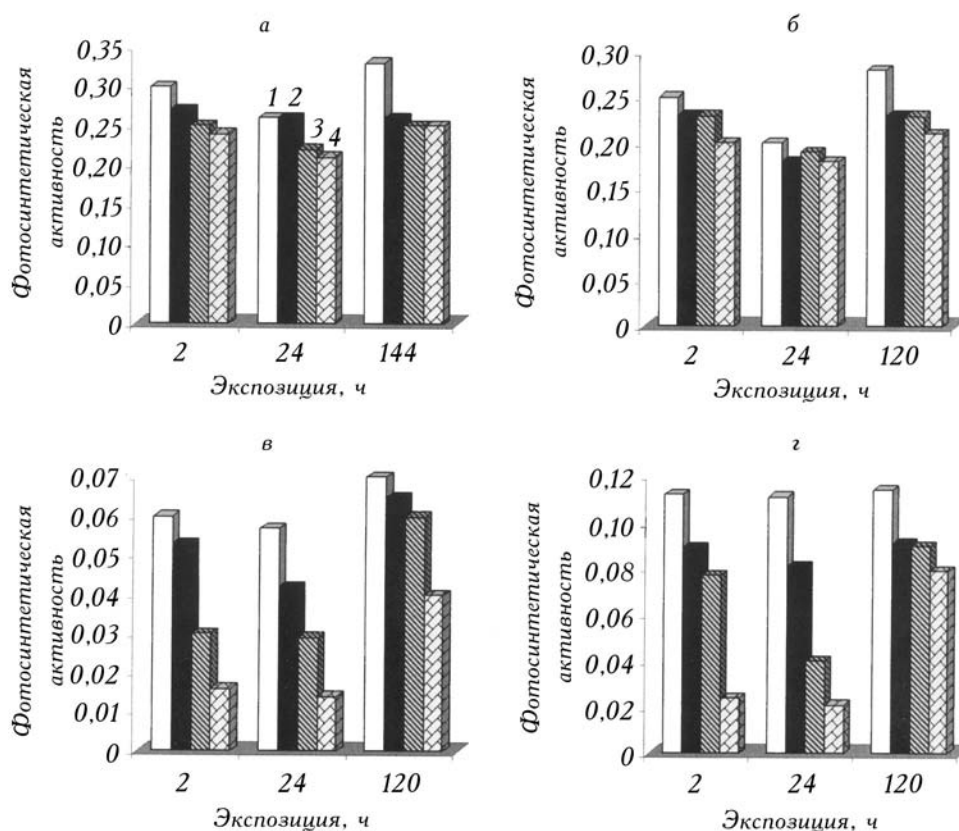
ние по биомассе. Основу общей биомассы планктонных водорослей в опытных вариантах оз. Вербного к концу эксперимента составляли зеленые и синезеленые водоросли. Усиление развития зеленых водорослей в опытных вариантах после прекращения облучения их УФ-светом могло быть обусловлено увеличением количества органического вещества в водной среде вследствие отмирания и лизиса клеток других групп водорослей под воздействием УФ-излучения.

Одним из показателей интенсивности протекания физиологических функций в клетках водорослей является потенциальная фотосинтетическая активность, которая характеризует степень их жизнеспособности. Коэффициент потенциальной фотосинтетической активности планктонных водорослей (K_f) при их облучении УФ-светом также претерпевал изменения (рис. 2). Так, уже через 2 ч после воздействия УФ-излучения на фитопланктон зал. Оболонь наблюдалось незначительное снижение исследуемого показателя в зависимости от времени действия стрессового фактора. Более заметное уменьшение фотосинтетической активности водорослевых клеток регистрировалось в опытах с фитопланктоном оз. Вербного и р. Десны. В частности, в первом случае значение K_f уменьшалось по сравнению с контролем в 3,7 раза, а во втором — в 4,6 раза, когда продолжительность облучения образцов составляла 10 мин.

В дальнейшем, через 24 ч после начала опыта, наблюдались уже более существенные изменения в уровнях потенциальной фотосинтетической активности. Если в опытах с фитопланктоном зал. Оболонь значение K_f при облучении образцов фитопланктона УФ-светом в течение 1 мин оставалось на уровне контроля, то при 5 и 10 мин облучения исследуемый показатель был ниже как по сравнению с контролем, так и с его величинами в начале опыта.

Нами зарегистрировано снижение потенциальной фотосинтетической активности и при воздействии УФ-излучения на фитопланктон оз. Центрального. Практически аналогичная тенденция наблюдалась и в опытах с планктонными водорослями оз. Вербного и р. Десны за тем лишь исключением, что определяемый показатель претерпевал здесь более резкие изменения — значения K_f при 10-минутном облучении были соответственно в 4,1 и в 5,3 раза ниже, чем в контроле.

Важно отметить, что после снятия стресс-фактора уровень потенциальной фотосинтетической активности планктонных водорослей вновь увеличивался. Особенно заметно это было в вариантах, где образцы планктонных водорослей облучали в течение 10 мин. Причиной этого, очевидно, был всплеск развития в опытных образцах зеленых водорослей, что, как уже отмечалось выше, могло быть обусловлено увеличением количества органического вещества в водной среде вследствие отмирания и лизиса клеток водорослей под воздействием УФ-излучения.

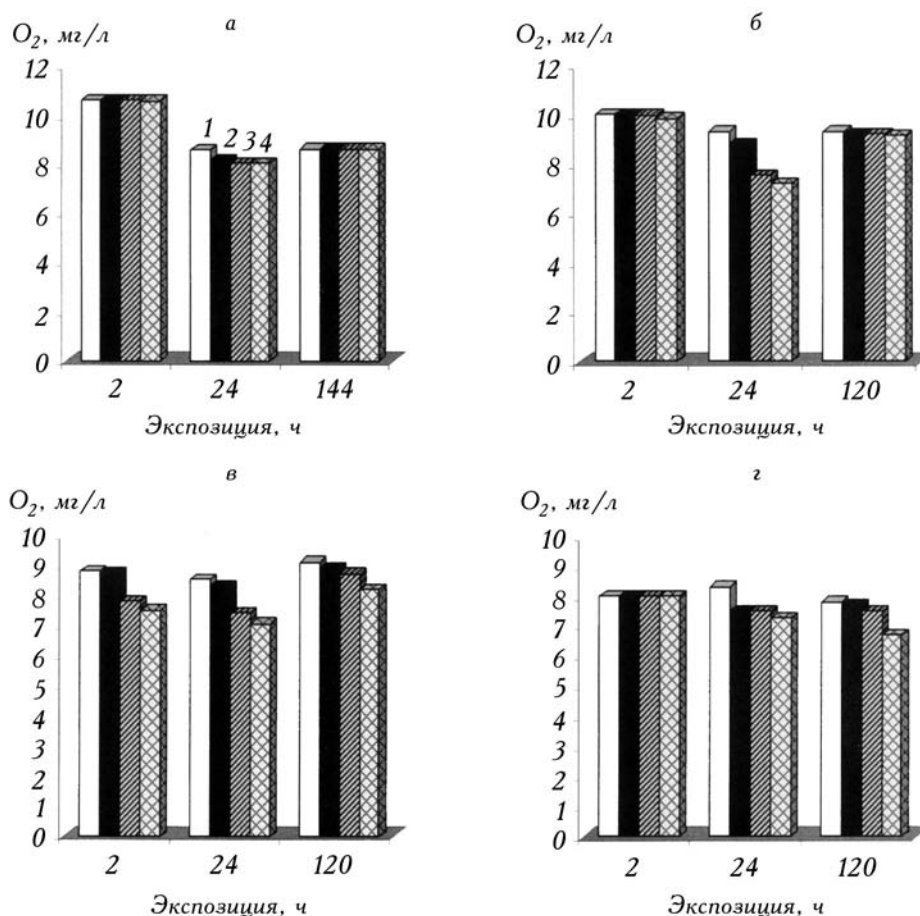


2. Изменение потенциальной фотосинтетической активности фитопланктона разнотипных водных объектов под влиянием УФ-излучения.

Одной из важных функций водорослей является их участие в фотосинтетической аэрации воды. В наших опытах влияние излучения УФ-спектра на фитопланктон сопровождалось явным снижением концентрации растворенного в воде кислорода. Такая тенденция регистрировалась во всех проведенных опытах (рис. 3).

Наиболее заметные изменения отмечены через 24 ч после начала эксперимента. Так, например, количество кислорода в воде зал. Оболонь и оз. Центрального при облучении ее УФ-светом в течение 10 мин уменьшалось по сравнению с контрольным вариантом на 10 и 30%, соответственно, а в воде оз. Вербного и р. Десны — на 10%. Характерной особенностью воздействия УФ-излучения на фотоаэрацию воды в процессе жизнедеятельности водорослей была обратная зависимость концентрации растворенного кислорода от времени облучения.

После снятия влияния исследуемого стрессового фактора на планктонные водоросли происходило восстановление интенсивности обогащения

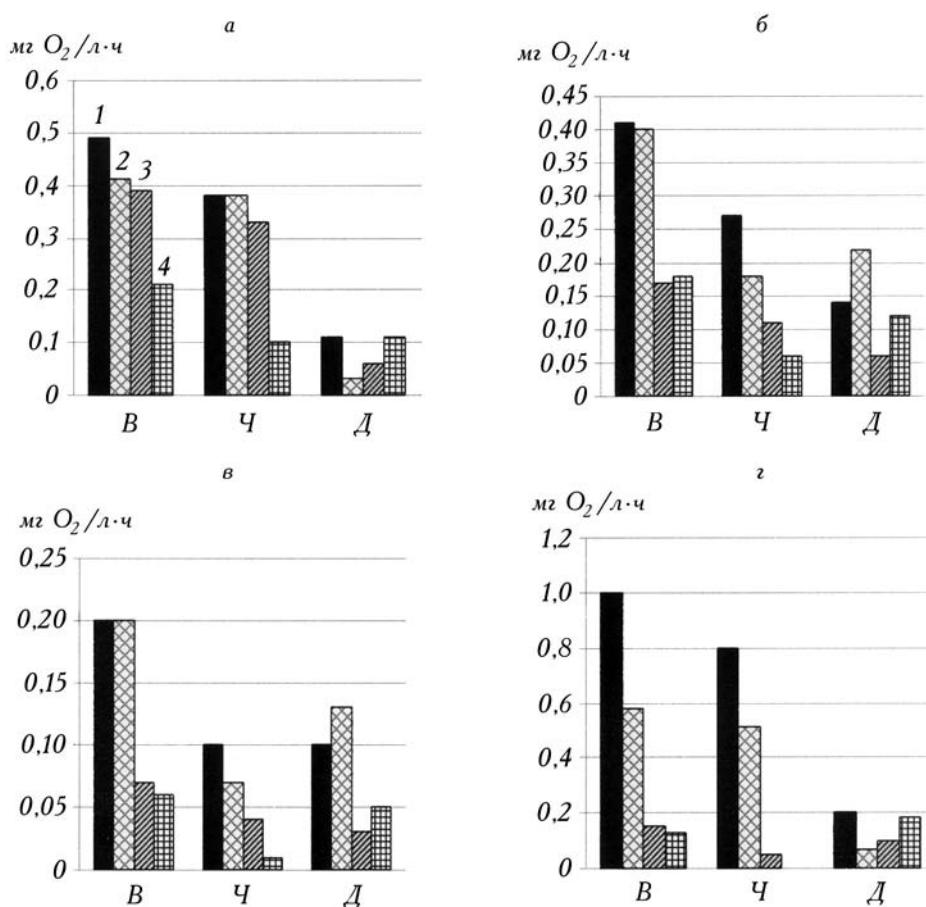


3. Изменение содержания растворенного кислорода в образцах природной воды под влиянием УФ-излучения.

воды кислородом вследствие фотосинтетической деятельности водорослевых клеток. Это можно было наблюдать во всех вариантах опыта. Так, в частности, в экспериментах с фитопланктоном зал. Оболонь и оз. Центральное количество кислорода в среде достигало контрольных значений.

В связи с возрастанием доли ультрафиолетовой компоненты в солнечной радиации, падающей на поверхность Земли, чрезвычайно важна оценка продукционно-деструкционных характеристик фитопланктона в этих условиях, ибо солнечное излучение, содержащее ультрафиолетовую составляющую, может вызвать необратимый ингибирующий эффект [3].

Известно, что об интенсивности истинного фотосинтеза (или иными словами — валовой первичной продукции) можно судить по различию содержания кислорода в светлой и затемненной склянках после известной экспозиции в природных условиях. Полученные нами данные свидетельствуют о



4. Изменение интенсивности фотосинтеза планктонных водорослей и деструкции органического вещества в образцах фитопланктона под влиянием УФ-излучения: В — валовая продукция; Ч — чистая продукция; Д — деструкция.

том, что ультрафиолетовое излучение оказывает существенное влияние на фотосинтез планктонных водорослей и деструкцию органического вещества (рис. 4).

По мере увеличения времени воздействия УФ-излучения происходило существенное снижение чистой и валовой продукции. Так, в экспериментах с фитопланктоном зал. Оболонь при 10-минутном облучении образцов чистая продукция уменьшилась по сравнению с контрольным вариантом в 3,8 раза, валовая — в 2,3 раза. Доля кислорода, поглощенного на деструкционные процессы, при этом достигала 52,4% валовой продукции, тогда как в контрольном варианте она составляла 22,4%.

Наши опыты показали, что при отсутствии влияния исследуемого стрессового фактора на растительный планктон оз. Центрального (контрольный вариант) чистая первичная продукция составляла 65,9% от валовой, тогда

как при наибольшем времени облучения водорослей УФ-светом (10 мин) она снижалась в 2 раза (см. рис. 4). Если в контрольном варианте деструкция составляла 34,1% валовой продукции, то после 10 мин воздействия УФ-излучения она увеличилась уже до 66,7%.

Характеризуя особенности протекания фотосинтетических процессов в клетках планктонных водорослей оз. Вербного в условиях влияния УФ-излучения, следует отметить, что при минимальной ее дозе (облучение на протяжении 1 мин) чистая продукция снижалась по сравнению с контролем в 1,4 раза, а поглощение кислорода увеличивалось в 1,3 раза. При увеличении времени воздействия стрессового фактора на озерный фитопланктон до 10 мин чистая первичная продукция составляла только 16,7% валовой, тогда как в контроле ее величина равнялась 50,0% (см. рис. 4). Следует отметить превалирование процесса деструкции над продукцией по мере увеличения времени воздействия УФ-излучения: если при 1 мин доля потребленного кислорода составляла 65,0% валового фотосинтеза, то при 10 мин она равнялась уже 83,3%.

Изменение продукционно-деструкционных процессов в образцах фитопланктона р. Десны под влиянием ультрафиолетового излучения характеризовалось подобной тенденцией. Так, в варианте при 1 мин облучения чистая первичная продукция уменьшалась по сравнению с контролем в 1,6 раза, а при 5 мин — в 16 раз. Наиболее ярко проявилось воздействие стрессового фактора при 10 мин облучения фитопланктона УФ-светом. Валовая первичная продукция здесь снизилась по сравнению с контролем в 7,7 раза на фоне доминирующего значения процессов химического и биохимического потребления кислорода (см. рис. 4).

Заключение

Ультрафиолетовая радиация оказывает существенное влияние на содержание хлорофилла *a* пресноводного фитопланктона, а также на его потенциальную фотосинтетическую активность. Наиболее резкое уменьшение содержания хлорофилла *a* по сравнению с контролем после облучения образцов фитопланктона УФ-светом отмечено для озер Вербного и Центрального, наименее — для р. Десны.

Влияние излучения УФ-спектра на сообщества растительного планктона из разнотипных водных объектов сопровождается заметным снижением интенсивности фотосинтетической аэрации воды.

УФ-излучение может угнетать продуктивность пресноводных планктонных водорослей и приводить к усилению деструкции органического вещества. Изменения интенсивности продукционно-деструкционных процессов фитопланктона зависят от продолжительности воздействия УФ-радиации.

После снятия влияния исследуемого стрессового фактора на пресноводные планктонные водоросли показатели содержания хлорофилла *a* и потенциальной фотосинтетической активности фитопланктона вновь увеличились, причиной чего,

на наш взгляд, явилось усиление развития в опытных вариантах представителей Chlorophyta.

**

Виявлено основні закономірності впливу ультрафіолетового випромінювання на вміст хлорофілу а, потенційну фотосинтетичну активність та інтенсивність продукування кисню фітопланктоном із різнотипних водних об'єктів.

**

Main conformities of influence UV-radiation on the content of chlorophyll a, potential photosynthetic activity and intensity of oxygen production of phytoplankton from different water bodies are revealed.

**

1. Грановская Л.А., Широкова Е.Л., Теличенко Л.А., Светлова Е.Н. Адаптационные изменения структурно-функциональных характеристик *Chlorella rugenoidosa* Chik (Chlorophyta) при воздействии ультрафиолетового облучения // Альгология. — 1993. — Т. 3, № 1. — С. 41—48.
2. Гусева К.А., Гончарова С.П. Действие ультрафиолетовых лучей на развитие синезелёных водорослей // Растительность волжских водохранилищ. — М.; Л.: Наука, 1966. — С. 81—88.
3. Кобленц-Мишке О.И. Фотосинтез морского фитопланктона в зависимости от подводной облучённости // Физиология растений. — 1979. — Т. 6, № 5. — С. 918—919.
4. Костяев В.Я. Биология и экология азотфиксирующих синезелёных водорослей пресных вод. — Л.: Наука, 1986. — 135 с.
5. Макаров М.В. Влияние ультрафиолета на рост массовых видов водорослей Баренцева моря // Эколого-физиологические исследования водорослей и их значение для оценки состояния природных вод. — Ярославль: Изд-во РАН, 1996. — С. 150—152.
6. Масюк Н.П., Посудин Ю.И., Лилицкая Г.Г. Фотодвижение клеток *Dunaliella* Teod. (Dunaliellales, Chlorophyceae, Viridiplantae). — Киев, 2007. — 265 с.
7. *Методи гідроекологічних досліджень поверхневих вод* / За ред. В. Д. Романенка. — К.: Логос, 2006. — 408 с.
8. *Методы физиолого-биохимического исследования водорослей в гидробиологической практике* / Под. ред. А. В. Топачевского. — Киев: Наук. думка, 1975. — 247 с.
9. Посудин Ю.И., Масюк Н.П., Лилицкая Г.Г. Влияние ультрафиолетового излучения на фотодвижение двух видов *Dunaliella* Teod. // Альгология. — 2004. — Т. 14, № 2. — С. 113—126.
10. *Теоретические основы и методы изучения флуоресценции хлорофилла* / В.М. Гольд, Н.А. Гаевский, Ю.С. Григорьев и др. — Красноярск: Ред.-изд. отд. Красноярск. ун-та, 1984. — 81 с.
11. Топачевский А.В., Масюк Н.П. Пресноводные водоросли Украинской ССР. — Киев: Вища шк., 1984. — 336 с.

12. Шуршикова Г.Н., Ладыгин В.Г. Снижение устойчивости клеток α -каротиновых мутантов *Chlamydomonas reinhardtii* Dang. к действию УФ-излучения // Альгология. — 1993. — Т. 3, № 4. — С. 47—51.
13. Bidigare R.R. Potential effects of UV-B radiation on marine organisms of the southern ocean: distributions of phytoplankton and krill during Austral spring // Photochem. and Photobiol. — 1989. — Vol. 50, N 4. — P. 469—477.
14. Döhler G., Hagmeier E., Grigoleit E., Krause K.D. Impact of solar UV- radiation on uptake N-Ammonia and N-Nitrate by marine diatoms and natural phytoplankton // Biochem. Physiol. Pflanz. — 1991. — Vol. 187, N 4. — P. 293—303.
15. Hader D.P., Worrest R.C. Effects of enhanced solar ultraviolet radiation on aquatic ecosystems // Photochem. and Photobiol. — 1991. — Vol. 53, N 5. — P. 717—725.
16. Marwood Ch.A., Smith R.E.H., Furgal J.A. et al. Photoinhibition of natural phytoplankton assemblages in Lake Erie exposed to solar ultraviolet // Can. J. Fish and Aquatic Sci. — 2000. — Vol. 57, N2. — P. 371—379.

Институт гидробиологии НАН Украины, Киев

Поступила 10.11.09