

УДК 581.526.325:574.5 (262.5)

Г. П. БЕРСЕНЕВА, Е. А. КУФТАРКОВА

СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА ОСНОВНЫХ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ФИТОПЛАНКТОНА В ПРИБРЕЖНЫХ ДЕФОРМИРОВАННЫХ ЭКОСИСТЕМАХ

Приведены результаты систематических наблюдений в течение двух лет за изменчивостью ряда гидробиологических и гидрохимических показателей (содержанием хлорофилла *a*, скоростью фотосинтеза, ассимиляционным числом, концентрацией органических и минеральных форм азота и фосфора) в прибрежной зоне Севастополя под влиянием выпуска сточных вод.

Влияние выпуска сточных вод выражается в нарушении сезонного хода концентрации хлорофилла *a* и повышении его содержания вблизи источника загрязнения на фоне повышенных концентраций биогенных элементов. Синхронность изменчивости хлорофилла *a* и гидрохимических показателей свидетельствует об ассимиляции минеральных соединений азота и фосфора фитопланктоном и о наличии процесса биохимической трансформации сточных вод в непосредственной близости от выпуска. Имеющиеся данные о многолетней динамике фитопланктона отражают ее сезонный характер. В зависимости от гидрометеорологических условий пики возрастания биомассы могут смещаться во времени, но наблюдения за ее величиной по содержанию хлорофилла за последние десять лет выявили довольно постоянные максимумы в зимний и весенний периоды и летний минимум в различных районах Черного моря [1]. На изменение сезонного хода хлорофилла могут влиять различные условия: метеорологические, антропогенный фактор и т. д. Задача настоящей работы — изучение влияния на сезонную динамику фитопланктона стока сточных вод.

Систематические наблюдения за изменчивостью гидробиологических показателей проводились нами в течение двух лет в прибрежной зоне Севастополя в районе бытового эвтрофирования. Период наблюдения разделен на два этапа: I — с февраля 1987 г. по февраль 1988 г.; II этап — с марта 1988 г. по апрель 1989 г. На I этапе в десяти точках по мере удаления от источника загрязнения измеряли концентрацию хлорофилла *a*, на втором — для наблюдений были выбраны две точки вблизи выпуска сточных вод и одна — в условно чистых водах. Проводили измерение концентрации хлорофилла *a* и его основных продуктов распада, скорости фотосинтеза, дыхания и рассчитывали ассимиляционное число. Для определения хлорофилла *a* использовали флюориметрический метод [5], скорости фотосинтеза — кислородный скляночный метод Винклера [6]. В качестве гидрохимических показателей измеряли уровни концентрации органических и минеральных форм азота и фосфора, а также соотношение между ними. При определении гидрохимических показателей использовали стандартные методы [3]. Колориметрирование окрашенных проб проводили на спектрофотометре „Spectol“.

Результаты и обсуждение. По характеру изменения концентрации хлорофилла *a* в районе загрязнения выделены зоны непосредственного влияния выпуска сточных вод (10 м от него), промежуточная (100 м) и наиболее удаленная (2000 м). Последняя нами принята за условно чис-

тые воды. Двухлетние систематические измерения позволили представить сезонное распределение содержания хлорофилла *a* в водах разной степени загрязнения и в зависимости от гидрометеорологических условий года.

На 1 этапе в 10 и 100 м от выпуска наблюдался синхронный ход показателей зеленого пигмента с четко выделенными максимумами. Наиболее высокие значения содержания хлорофилла *a* ($1,2-1,6 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$) получены в весенний и зимний периоды, несколько меньшая величина ($0,9-1,1 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$) — в летний. Незначительный максимум хлорофилла *a* отмечен в осенний период (рис. 1, *a*). Амплитуда колебаний между максимальными и минимальными значениями хлорофилла составила 8. В отличие от этих зон, находящихся вблизи

источника загрязнения, сезонный ход хлорофилла в условно чистых водах характеризовался максимумами в ноябре, феврале, марте и летним минимумом в июне, связанным с обеднением верхнего слоя биогенными элементами. Такой ход типичен для открытых и прибрежных вод Черного моря. Вероятно, постоянный подток биогенных элементов за счет выпуска сточных вод явился причиной повышения количественного показателя биомассы фитопланктона в летний период, оказавшись следствием повышенной рекреационной нагрузки.

Влияние сточных вод отражается и на сезонной изменчивости гидрохимических показателей. Их концентрация вблизи источника загрязнения (до 100 м) обусловлена только режимом работы выпуска. Максимальные значения, почти на порядок превосходящие средние, отмечались в июне—июле, минимальные — зимой. Благодаря высоким градиентам снижения концентрации загрязняющих веществ влияние выпуска по гидродинамическим показателям обнаруживалось только на расстоянии до 500 м. В 2000 м от выпуска их сезонный ход был четко выражен, и наиболее хорошая согласованность наблюдалась между изменчивостью концентраций хлорофилла *a* и минерального фосфора.

Второй период наблюдений характеризовался более высокими абсолютными величинами содержания хлорофилла в период максимальных значений и появлением новых максимумов. В феврале концентрация хлорофилла достигала $2,6 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$, а в летний и осенний периоды — $3,6 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ (рис. 1, *б*). Амплитуда колебаний в этот период исследований была значительнее, чем в предыдущий, составляя 9,5. Летний максимум в относительно чистых водах оказался несколько ниже, чем в водах вблизи источника загрязнения, но явно проявлял свое присутствие. Следует отметить появление очень высокого максимума хлорофилла в осенний период вблизи выпуска сточных вод. Поскольку в чистых водах он не отмечен, его появление связано, вероятно, с режимом работы выпуска в этот период.

На зависимость изменения содержания хлорофилла фитопланктона от концентрации биогенных элементов помимо нарушения сезонного хода указывает и повышение его вблизи источника загрязнения на фоне

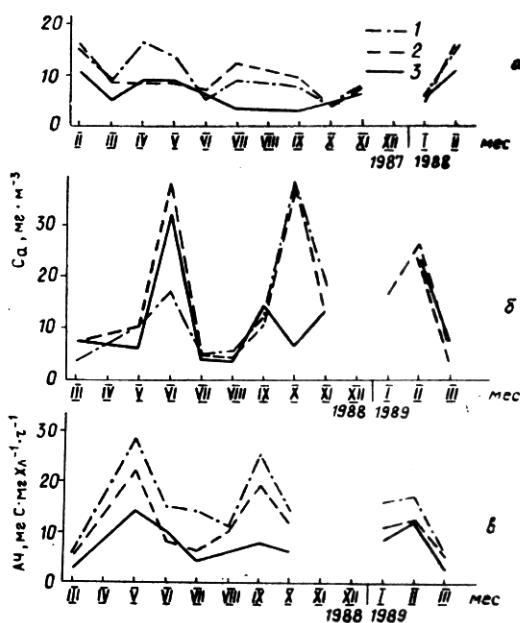


Рис. 1. Сезонные изменения концентрации хлорофилла *a* (C_a) в 1987—1988 (*a*) и 1988—1989 гг. (*б*), а также АЧ (*в*) на расстоянии 10 м (1), 100 (2) и 2000 м (3) от выпуска сточных вод (3 — контроль)

Относительное изменение концентрации хлорофилла *a* и минерального фосфора на разном удалении от источника загрязнения, %

Расстояние от источника загрязнения, м	Зима		Весна		Лето		Осень	
	C_a	PO_4^{3-}	C_a	PO_4^{3-}	C_a	PO_4^{3-}	C_a	PO_4^{3-}
0	100	100	100	100	100	100	100	100
10	116	55	119	70	127	35	119	121
20—50	113	24	74	34	159	19	93	53
100—500	88	16	62	21	152	10	84	33
1000	32	12	55	11	155	4	82	19
2000	28	16	59	8	79	5	79	21

повышенных концентраций гидрохимических показателей. На протяжении 1987—1988 гг. по среднегодовым показателям концентрация хлорофилла *a* снижалась от $0,85 \pm 0,27$ мг·м⁻³ вблизи источника загрязнения до фоновых концентраций в чистой воде ($0,57 \pm 0,15$ мг·м⁻³). Особенно четко эта тенденция проявлялась в отдельные сезоны. Приводим величины относительного изменения концентрации хлорофилла *a* и минерального фосфора на разном удалении от источника загрязнений по отдельным сезонам (таблица).

Наиболее резкий градиент снижения концентрации хлорофилла *a* относительно выпуска наблюдался весной: от 11,9 до 74% соответственно на расстояниях 10 и 20—50 м. Более плавное снижение концентрации хлорофилла *a* относительно выпуска отмечено в осенний и зимний периоды. В летний период из-за повышения рекреационной нагрузки и степени минерализации органического вещества сточных вод увеличение содержания хлорофилла *a* наблюдалось на большем расстоянии от источника загрязнения. Изучение механизма трансформации химических ингредиентов показало следующее. Их высокая концентрация на выпуске определяется режимом работы очистных сооружений, объемом сточных вод, качеством очистки стоков и другими факторами, а последующее снижение определяемых показателей имеет экспоненциальный характер. Максимальные градиенты убыли значений отмечались на расстоянии 10—20 м от «факела», а затем равномерно снижались. На расстоянии 500 м влияние выпуска сточных вод на концентрацию химических показателей не обнаруживалось. Максимальное снижение концентрации хлорофилла *a* соответствовало максимальному снижению относительного содержания фосфора (рис. 2). Таким образом, эффект резкого отрицательного градиента концентрации биогенных элементов вблизи выпуска кроме динамических факторов обусловлен и потреблением их фитопланктоном.

Повышение концентрации хлорофилла *a* вблизи выпуска находится в соответствии с резким понижением в этой зоне (до 50%) отношения неорганического азота и фосфора к органическому ($N_{мин}/N_{орг}$; $P_{мин}/P_{орг}$). При распаде органического фосфора и азота образуются их минеральные формы. В лабораторных экспериментах, несмотря на интенсивное снижение $P_{орг}$, накопления фосфатов не наблюдалось, что свидетельствует об утилизации их гидробионтами, а синхронность изменчивости хлорофилла *a* и гидрохимических показателей — об ассимиляции минеральных соединений азота и фосфора фитопланктоном и о наличии процесса биохимической трансформации сточных вод в непосредственной близости от выпуска.

В течение годового цикла с мая 1988 г. по май 1989 г. проведены эксперименты по изучению скорости фотосинтеза, его соотношения с концентрацией хлорофилла, скорости дыхания природного фитопланктона, развивающегося вблизи факела (10 и 100 м), и на значительном удалении — 2000 м (условно чистые воды). Скорость фотосинтеза измеряли кислородным скляночным методом после четырехчасовой экспозиции при естественном освещении (33—35 тыс. лк) в послеполуденные

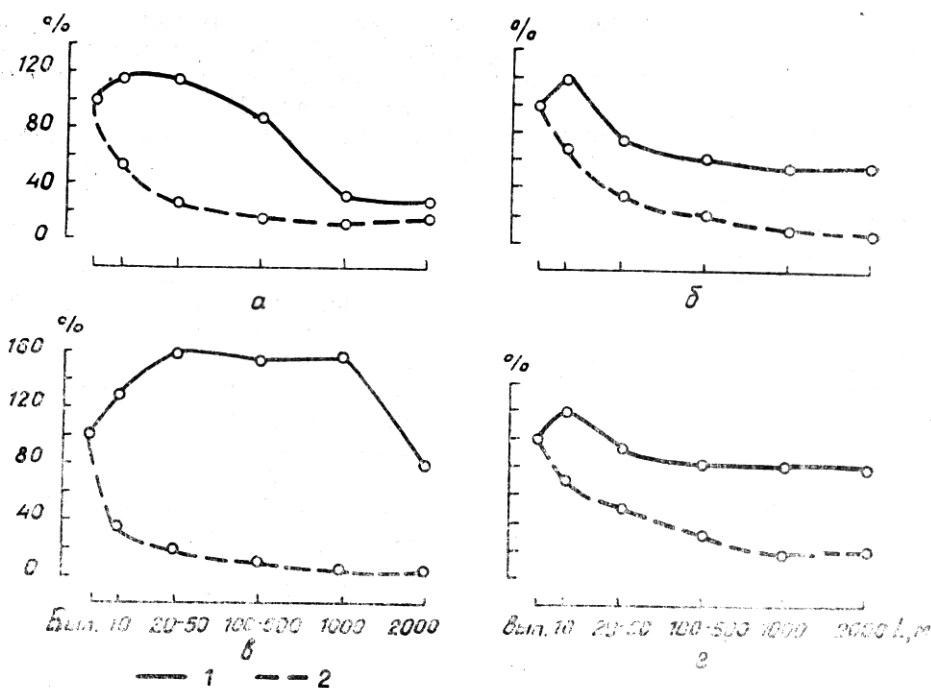


Рис. 2. Сезонная изменчивость хлорофилла *a* (1) и фосфатов (2) на разном удалении от факела, относ. ед.:
a — зима; *б* — весна; *в* — лето; *г* — осень

часы. Температуру поддерживали в пределах аналогичных колебаниям ее в море. При таких условиях получены максимальные ассимиляционные числа (АЧ), представляющие собой максимальную скорость фотосинтеза на единицу хлорофилла природного фитопланктона. Результаты полученных экспериментов представлены на рис. 1, *в*. В целом можно отметить, что во всех исследованных точках получены высокие величины удельной скорости фотосинтеза. Это говорит о том, что прибрежная часть Черного моря в районе Севастополя достаточно обеспечена биогенными элементами по сравнению с открытой его частью, где АЧ летом составляли 2—4 мг С·мг Хл. $a^{-1} \cdot ч^{-1}$. Полученные нами данные в чистых водах сравнимы с величинами АЧ, измеренными в Севастопольской бухте в 1985 г. [2].

В зоне непосредственного влияния выпуска удельная скорость фотосинтеза в периоды максимальных значений была в 1,4—3 раза выше, чем в условно чистых водах, в периоды минимума — в 2—3,5 раза. Несколько меньшая разница получена для 100-метровой точки (в 1,1—2,4 и 1,5—1,7 раза соответственно). В изменении ассимиляционного числа четко выражена сезонность (см. рис. 1, *а*). В конце весны и начале лета получены более высокие ассимиляционные числа для загрязненной и чистой зон (соответственно 22—28 и 14 мг С·мг Хл. $a^{-1} \cdot ч^{-1}$). Этот период характеризуется развитием диатомового комплекса, для представителей которого характерны наиболее высокие скорости фотосинтеза. В холодный период года (с февраля по май) в этой зоне диатомей составляли 45—50% [7]. Наибольшим видовым разнообразием отличался род *Chaetoceros*, а массовыми были мелкоклеточные *Skeletonema costatum*, которые нередко вызывали «цветение» воды. Именно эти виды обладают высокими удельными скоростями фотосинтеза в условиях культур. Несколько меньшие АЧ получены в осенний период во время доминирования пиропитовых водорослей (соответственно 25 и 8 мг С·мг Хл. $a^{-1} \cdot ч^{-1}$). Наиболее низкие АЧ отмечены в зимний и позднелетний периоды (соответственно 6—14 и 4—12 мг С·мг Хл. $a^{-1} \cdot ч^{-1}$).

Возрастание ассимиляционных чисел до максимальных значений предшествует повышению биомассы фитопланктона. За периодом увеличения производительности работы единицы хлорофилла через месяц следует нарастание биомассы фитопланктона (см. рис. 1).

Таким образом, в прибрежной зоне Черного моря уровень биогенной обеспеченности достаточно высок, чтобы поддерживать продукционную способность водорослей на более высоком уровне, чем в открытом море. Тем не менее повышение содержания биогенных элементов вблизи выпуска сточных вод способствует еще более значительному возрастанию удельной скорости фотосинтеза, что может привести к эвтрофированию района вблизи выпуска. Относительное содержание продуктов распада хлорофилла (феопигментов) в пределах 9—37% (самое высокое в осенний период (30—37%), а наиболее низкое — весной (9—20%)) согласуется с нашими прежними измерениями в Черном море в разные сезоны [1]. По направлению струи от факела увеличения относительного содержания фео пигментов не отмечено, что говорит об одинаковом физиологическом состоянии клеток фитопланктона вблизи источника загрязнения и вне его влияния. На это же указывает и величина скорости дыхания. Она составляет значительную долю валового фотосинтеза, колеблющуюся в пределах 20—60% (в среднем 35%), но по направлению от загрязненных к чистым водам показания относительно постоянны.

1. Берсенева Г. П. Временная изменчивость пигментов фитопланктона Черного моря // Динамика вод и продуктивность планктона Черного моря. — М.: ИОАН СССР, 1988. — С. 282—284.
2. Стельмах Л. В. Вклад пикопланктона в первичную продукцию и содержание хлорофилла *a* в эвтрофных водах на примере Севастопольской бухты // Океанология. — 1988. — 28, вып. 1. — С. 127—132.
3. Методы гидрохимических исследований основных биогенных элементов. — М.: ВНИРО, 1988. — 119 с.
4. Финенко Э. З. Первичная продукция в летний период // Динамика вод и продуктивность планктона Черного моря. — М.: ИОАН СССР, 1988. — С. 315—323.
5. Юнев О. А., Берсенева Г. П. Флюориметрический метод определения концентрации хлорофилла *a* и феофитина *a* в фитопланктоне // Гидробиол. журн. — 1986. — 22. — С. 102—106.
6. Чернякова А. М. Определение растворенного кислорода // Методы гидрохимических исследований океана. — М.: Наука, 1978. — С. 133—150.
7. Чепурнова Э. А., Сеничкина Л. Г., Шумакова Г. В., Манжос Л. А. Динамика гидрологических показателей в районе загрязнения морских прибрежных вод хозяйственно-бытовым стоком // Океанографические аспекты охраны морей и океанов от химических загрязнений. — М.: Гидрометеониздат, 1990. — С. 154—158.

Ин-т биологии юж. морей им. А. О. Ковалевского
АН Украины, Севастополь

Получено
29.11.90

G. P. BERSENEVA, E. A. KUFTARKOVA

SEASONAL DYNAMICS OF BASIC PHYSIOLOGICAL INDICES OF PHYTOPLANKTON IN THE COASTAL DEFORMED ECOSYSTEMS

Summary

The work embraces results of systematic two-year observations of variability of hydrobiological and hydrochemical indices in the coastal zone of Sevastopol in the region of domestic sewage outlet. It breaks a seasonal course of chlorophyll „a“ concentration and increases its content in the vicinity of the pollution source, which is a result of higher recreation load.