

**ОСНОВНЫЕ СТРУКТУРНО-
ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ
ФИТОПЛАНКТОНА
ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД
ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО
МОРЯ В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД**

*Л.В. Стельмах, И.И. Бабич,
Н.Ю. Родионова*

Институт биологии южных морей
НАН Украины,
г. Севастополь, пр. Нахимова, 2
E-mail: lstelm@ibss.iuf.net

*В основу работы положены результаты, полученные в период 70-го рейса нис «Профессор Водяницкий» в западную часть Черного моря в августе 2011 г. Исследованы содержание основных питательных веществ в воде, таксономический состав и удельная скорость роста фитопланктона, скорость его потребления микрозоопланктоном, концентрация хлорофилла *a* в планктоне, отношение между органическим углеродом и хлорофиллом *a* в клетках микроводорослей. Выявлены количественные связи между исследованными характеристиками.*

Введение. В течение года в фитопланктоне как мелководных, так и глубоководных районов Черного моря наблюдается периодическая перестройка таксономической и размерной структуры фитопланктона [1]. Так, в начале и в середине летнего периода в фитопланктоне часто доминируют динофитовые водоросли и кокколитофориды [2]. В конце лета в августе в фитопланктоне возрастает доля диатомовых видов водорослей, что неизбежно приводит к изменениям его основных структурных и функциональных характеристик.

Цель настоящей работы состояла в том, чтобы исследовать основные структурно-функциональные характеристики фитопланктона поверхностных вод западной части Черного моря в конце летнего периода и выявить количественные связи между ними.

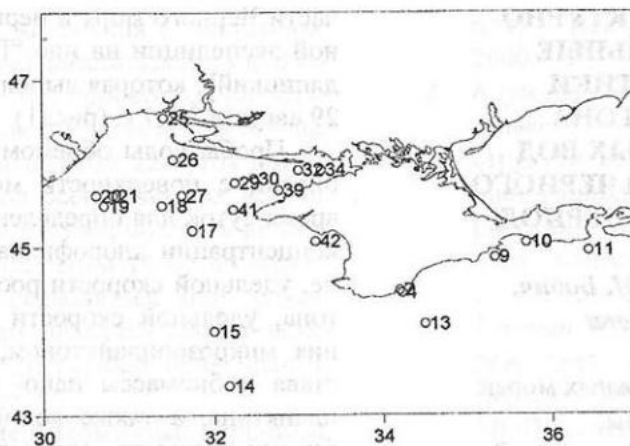
Материал и методика. В основу работы положены исследования, выполненные в поверхностных водах западной

части Черного моря в период 70-й научной экспедиции на нис «Профессор Водяницкий», которая выполнялась с 18 по 29 августа 2011 г. (рис. 1).

Пробы воды объемом 12 – 15 л отбирали с поверхности моря в светлое время суток для определения суммарной концентрации хлорофилла *a* в планктоне, удельной скорости роста фитопланктона, удельной скорости его потребления микрозоопланктоном, видового состава и биомассы нано- и микрофитопланктона, а также концентрации биогенных веществ (нитратов, аммония, фосфатов и кремния). Определение удельной скорости роста фитопланктона и удельной скорости его потребления микрозоопланктоном осуществляли с помощью метода разведения проб [3], который подробно описан нами ранее [4]. Содержание хлорофилла *a* в пробах микропланктона измеряли с помощью флуориметрического метода [5].

Для определения видов водорослей, относящихся к нанофитопланктону и микрофитопланктону, и величины отношения органического углерода к хлорофиллу *a* в фитопланктоне (С/Хл *a*), пробы воды объемом 2 – 3 л сгущали в воронке обратной фильтрации на нуклеопоровых фильтрах с диаметром пор 1 мкм. Сгущенную пробу объемом 100 мл делили на две части, одну из которых фиксировали 1 % нейтрализованным формалином и использовали для определения видового состава, численности и биомассы фитопланктона. Вторую часть пробы для определения концентрации хлорофилла осаждали на стекловолокнистые фильтры типа GF/F, которые хранили при –20 °С в течение 7 – 20 дней до начала их обработки.

Идентификацию видов водорослей, определение их численности и линейных размеров осуществляли по методике, описанной в работе [4]. Содержание органического углерода рассчитывали по среднему объему клеток для определенных видов по уравнениям, приведенным в работе [6]. Измерения фосфатов, нитратов, аммония и кремния выполнены с помощью стандартных методов [7].

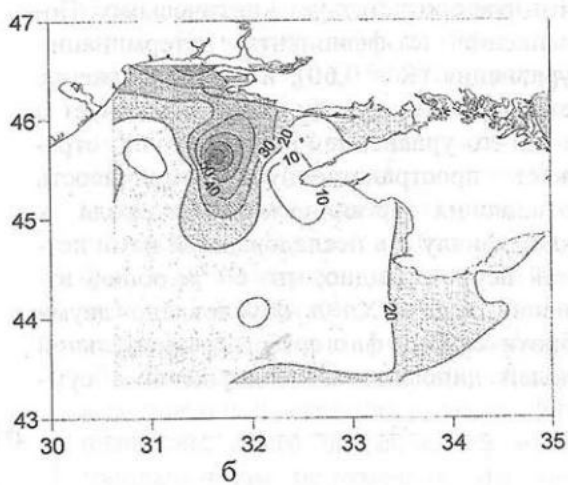
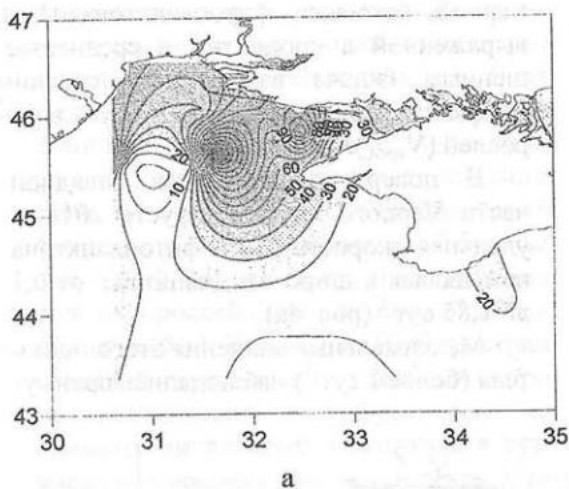


Р и с. 1. Схема расположения станций в западной части Черного моря, на которых измеряли структурно-функциональные характеристики фитопланктона в августе 2011 г.

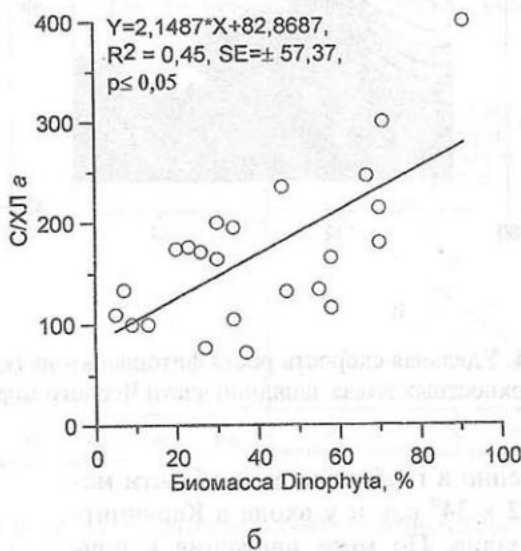
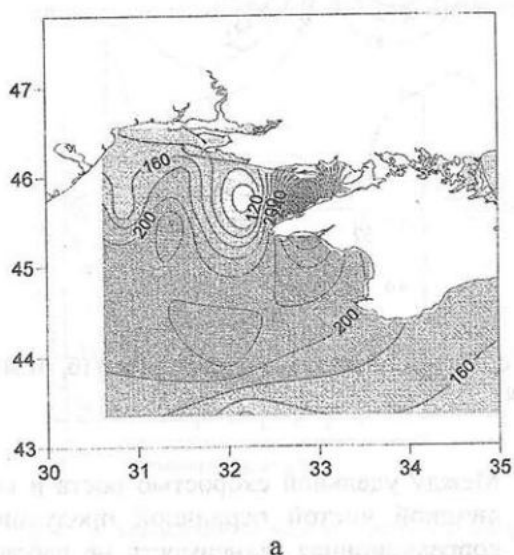
Результаты и обсуждение. В период наших исследований интенсивность солнечной радиации и температура воды в поверхностном слое достигали максимальных значений. Суммарная за день солнечная радиация находилась в диапазоне от 40 до 60 $\text{Э}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{день}^{-1}$, а температура воды на поверхности составляла около 25 °С. На подавляющем большинстве станций концентрация нитратов в поверхностных водах была невысокой и составляла 0,03 – 0,18 мкМ. Лишь на ст. 4, расположенной у юго-восточного берега Крыма, этот показатель повысился до 0,45 мкМ. Содержание аммонийного азота изменялось на порядок: от 0,22 до 2,42 мкМ. Концентрация кремния была достаточно высокой и в большинстве случаев находилась в диапазоне от 0,66 до 8,14 мкМ. Поэтому на большей части исследованной акватории преобладали диатомовые виды водорослей, для развития которых необходим кремний. Биомасса представителей этой группы водорослей составляла в основном более 50 % от суммарной. Среди них доминировали *Pseudosolenia calcar-avis*, *Thalassionema nitzschooides*, *Chaetoceros affinis*, *Ch. curvisetus*. Только в локальных зонах, расположенных в центре северо-западного района, и в Каркинитском заливе их доля была менее 30 – 40 %. Здесь основную биомассу фитопланктона создавали динофитовые виды водорослей, представители таких родов, как *Ceratium*, *Protoperidinium*, *Gymnodinium*. В микропланктоне (< 200 мкм) биомасса

водорослей, рассчитанная нами по концентрации хлорофилла *a* и отношению *C/Хл a* и выраженная в единицах углерода, была в поверхностном слое в основном невысокой. Исключение составляет центр северо-западной части моря и вход в Каркинитский залив, где ее значения были максимальными и составляли 105 – 186 $\text{мгС}\cdot\text{м}^{-3}$ (рис. 2 а). По мере движения в глубоководную область этот показатель снижался на порядок. Значения чистой первичной продукции, рассчитанные по удельной скорости роста фитопланктона и его биомассе, достигали максимума также в центре северо-западной части, где составляли 40 – 85 $\text{мгС}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{сут}^{-1}$. На остальной акватории она была, в основном, в диапазоне от 8 до 30 $\text{мгС}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{сут}^{-1}$ (рис. 2 б).

На большей части акватории отношение между органическим углеродом и хлорофиллом *a* в клетках фитопланктона было выше 160, а на отдельных станциях северо-западной части моря и в Каркинитском заливе превышало 200 (рис. 3 а). Это связано, прежде всего, с высокими значениями солнечной радиации, падающей на поверхность моря и крайне низкими концентрациями нитратов в период наблюдений. Кроме того, анализ результатов показал, что между величиной *C/Хл a* и относительной биомассой динофитовых водорослей наблюдается линейная зависимость (рис. 3 б),



Р и с. 2. Пространственная изменчивость: а – биомассы фитопланктона ($\text{mgC}\cdot\text{m}^{-3}$) и б – чистой первичной продукции ($\text{mgC}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{сут}^{-1}$) в поверхностных водах западной части Черного моря в августе 2011 г.



Р и с. 3. Пространственное распределение отношения $C/\text{chl } a$ (а) и зависимость этого показателя от доли динофитовых водорослей в суммарной биомассе фитопланктона (б) в поверхностных водах западной части Черного моря в августе 2011 г.

из которой следует, что при высоком относительном вкладе динофитовых водорослей в суммарную биомассу фитопланктона, составлявшим более 55 %, величина $C/\text{Хл } a$ была выше 200. Хотя коэффициент детерминации для этой зависимости невысокий ($R^2 = 0,45$), полученная связь является достоверной. Стандартная ошибка коэффициентов уравнения была около 25 %. Значение F -критерия (17,37) для уравнения при $p = 0,0004$ существенно превышало критическую величину. Совершенно оче-

видно, что на отношение органического углерода к хлорофиллу a влияют и другие факторы. Применяв метод множественной линейной регрессии, мы получили уравнение:

$$C/\text{Хл } a = 2,325 \cdot D\% + 0,009 \cdot V_{\text{сред.}} + 41,00, \\ R^2 = 0,60; SE = \pm 53,87. \quad (1)$$

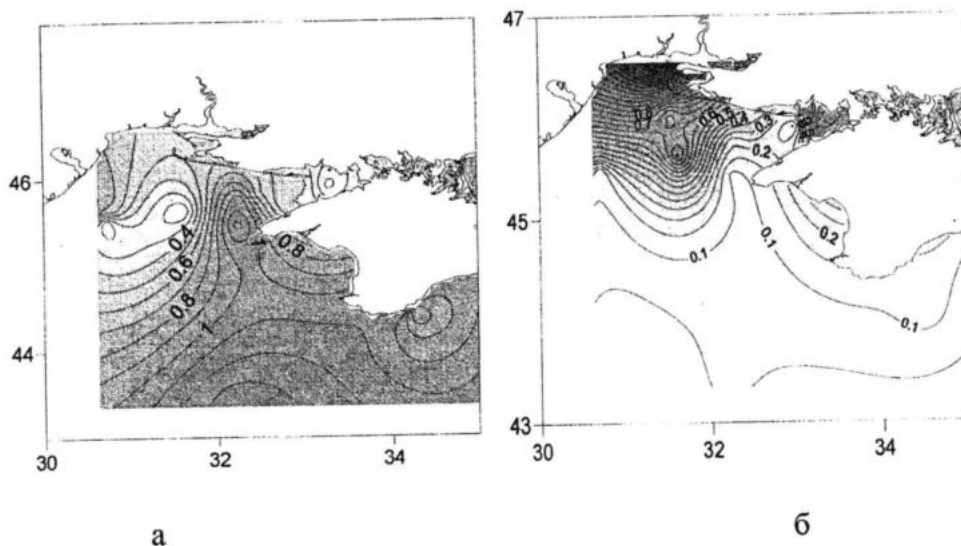
Критерий Фишера для этого уравнения составил 11,75 ($p = 0,004$), что в несколько раз превышает его табличное значение,

которое соответствует критическому. Повышение коэффициента детерминации уравнения ($R^2 = 0,60$), а также снижение стандартной ошибки свидетельствует о том, что уравнение (1) более точно отражает пространственную изменчивость отношения органического углерода к хлорофиллу *a* в исследованный нами летний период. Видно, что 60 % общей изменчивости $C/Хл\ a$ обусловлено двумя биотическими факторами: относительной долей динофитовых водорослей в сум-

марной биомассе фитопланктона ($D\%$), выраженной в процентах, и средневзвешенным (иначе взвешенным средним арифметическим) объемом клеток водорослей ($V_{\text{сред.}}$).

В поверхностных водах западной части Черного моря в августе 2011 г. удельная скорость роста фитопланктона изменялась в широком диапазоне: от 0,1 до 1,85 сут^{-1} (рис. 4а).

Максимальные значения этого показателя (более 1 сут^{-1}) наблюдались преиму-



Р и с. 4. Удельная скорость роста фитопланктона (а, сут^{-1}) и концентрация хлорофилла *a* (б, $\text{мг}\cdot\text{м}^{-3}$) в поверхностных водах западной части Черного моря

ущественно в глубоководной области между 32 и 34° в.д. и у входа в Каркинитский залив. По мере движения в прибрежную часть к Приднестровскому лиману и устью Днепра удельная скорость роста водорослей снижалась до 0,1 – 0,4 сут^{-1} .

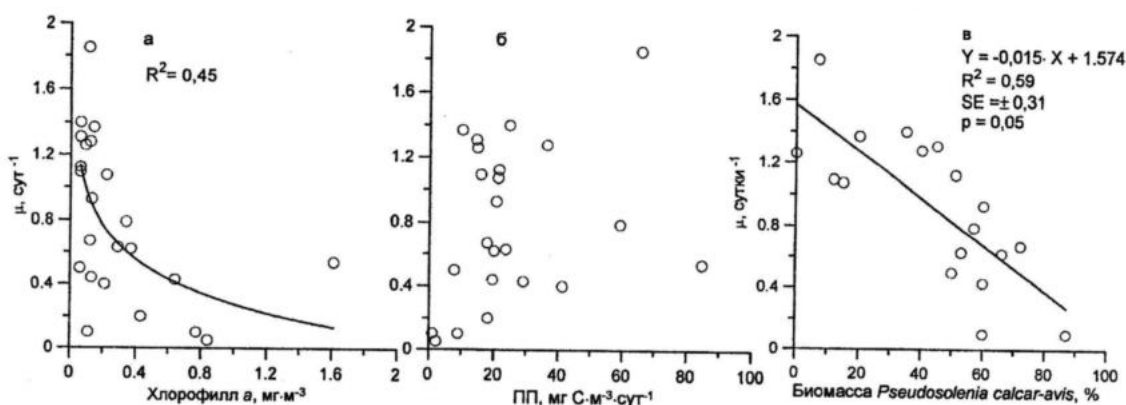
Видно, что зоны максимальных значений удельной скорости роста совпадают с минимальным содержанием хлорофилла в планктоне (рис. 4 б). Поэтому получена количественная связь между удельной скоростью роста фитопланктона и концентрацией хлорофилла *a* (рис. 5 а), из которой следует, что удельная скорость роста была выше 1 сут^{-1} при концентрации хлорофилла менее 0,2 $\text{мг}\cdot\text{м}^{-3}$. Вероятно, в зонах с низкой концентрацией хлорофилла, которые находились в глубоководной части моря и у берегов Крыма, складывались наиболее благоприятные условия для роста водорослей.

Между удельной скоростью роста и величиной чистой первичной продукции корреляционная зависимость не наблюдалась (рис. 5 б). Это связано с тем, что величина чистой первичной продукции зависит не только от удельной скорости роста фитопланктона, но и от скорости его потребления микрозоопланктоном и биомассы фитопланктона.

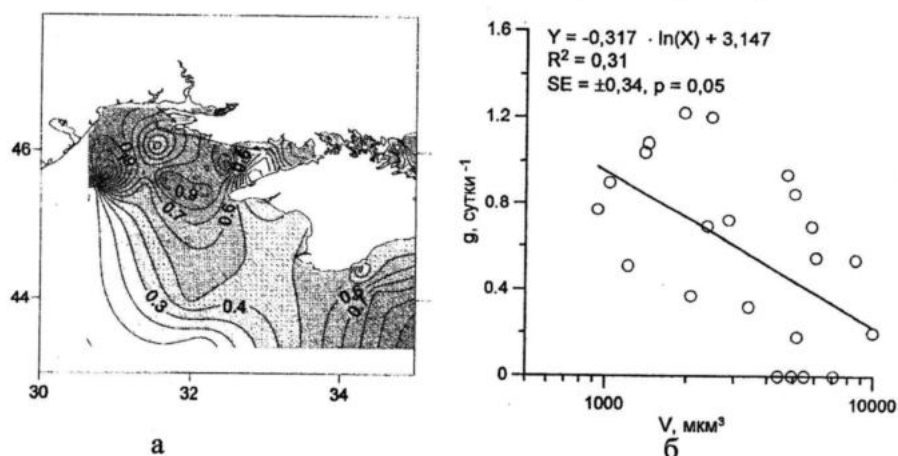
Известно, что одним из основных факторов, влияющим на скорость роста фитопланктона, являются биогенные вещества. Однако количественные связи между удельной скоростью роста фитопланктона и концентрацией биогенных веществ в воде не наблюдались. Эти результаты подтверждают мнение о том, что удельная скорость роста фитопланктона определяется внутриклеточным содержанием биогенных веществ, которое может отличаться от их количества в воде [8]. Среди биотических факторов,

влияющих на рост водорослей, основными являются таксономическая и размерная структура фитопланктона. В августе 2011 г. для станций, на которых доминировали диатомовые виды водорослей, получена обратная линейная связь между удельной скоростью роста фитопланктона и относительной биомассой одной из самых крупных диатомовых водорослей Черного моря *P. calcar-avis* (рис. 5 в). Видно, что 59 % пространственной изменчивости удельной скорости роста водорослей обусловлено неодинаковым вкладом этого вида в суммарную биомассу фитопланктона. Статистический анализ подтвердил достоверность полученной связи. Критерий Фишера был равен 23,16 при $p = 0,0002$. Стандартная ошибка коэффициентов уравнения составила 20 % для первого

коэффициента и 10 % для второго. Критерий Стьюдента для коэффициентов уравнения при $p \leq 0,0002$, превышал критические значения. Удельная скорость выедания фитопланктона микрозоопланктоном (g) на исследованной акватории поверхностных вод изменялась в широком диапазоне: от 0 до 1,55 сут⁻¹ (рис. 6 а). Максимальные значения получены в мелководной северо-западной части, минимальные – в глубоководной области моря. Количественная связь между удельной скоростью роста фитопланктона и его потреблением микрозоопланктоном не отмечена. Это свидетельствует о том, что процессы роста фитопланктона и его выедания регулируются разными факторами, о чем авторы данной работы писали и ранее [9]. Для летнего периода 2011 г. выявлено,



Р и с. 5. Зависимость между удельной скоростью роста фитопланктона и концентрацией хлорофилла а (а), а также первичной продукцией (б) и долей *P. calcar-avis* в суммарной биомассе фитопланктона (в) в поверхностных водах западной части Черного моря в августе 2011 г.



Р и с. 6. Пространственное распределение удельной скорости потребления фитопланктона микрозоопланктоном, сут⁻¹ (а) и зависимость этого показателя от средневзвешенного объема клеток фитопланктона (б) в поверхностных водах западной части Черного моря в августе 2011 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

что удельная скорость потребления фитопланктона микрозоопланктоном в значительной мере зависит от качества пищи, показателем которого является в данном случае средневзвешенный объем клеток фитопланктона (рис. 6 б). Видно, что по мере увеличения среднего объема клеток фитопланктона его потребление микрозоопланктоном значительно снижалось. Коэффициент детерминации в данном случае невысокий, тем не менее, очевидно, что крупные и мелкие клетки водорослей потребляются с разной скоростью.

Заключение. В августе 2011 г. в поверхностных водах западной части Черного моря основную биомассу фитопланктона создавали, чаще всего, диатомовые водоросли, среди которых доминировала самая крупная черноморская диатомовая *P. calcar-avis*. Выявлена четкая пространственная неоднородность в распределении основных структурно-функциональных характеристик фитопланктона. Наиболее высокие значения биомассы фитопланктона, первичной продукции и концентрации хлорофилла отмечены в локальных участках мелководного северо-западного района. В глубоководной области эти показатели были минимальны. Пространственная изменчивость отношения $C/Xл a$ на 60 % определялась долей динофитовых водорослей в суммарной биомассе фитопланктона и средним объемом клеток фитопланктона. Удельная скорость роста фитопланктона была максимальна в глубоководной области, а по мере движения в мелководную северо-западную часть моря снижалась, что обусловлено увеличением доли крупной диатомовой водоросли *P. calcar-avis* в суммарной биомассе фитопланктона. Удельная скорость потребления фитопланктона микрозоопланктоном зависела от качества пищи, что подтверждается обратной зависимостью между удельным потреблением фитопланктона и средним объемом его клеток.

1. Георгиева Л.В. Видовой состав и динамика фитоценоза // Планктон Черного моря [отв. ред. А.В. Ковалев, З.З. Финенко]. – К.: Наук. Думка, 1993. – С. 31–55.
2. Oguz T., Merico A. Factors controlling the summer *Emiliania huxleyi* bloom in the Black Sea: A modeling study // Journal of Marine Systems, 2006. – 59. – P. 173–188.
3. Landry M.R., Hassett R.P. Estimating the grazing impact of marine microzooplankton // Marine Biology. – 1982. – 67. – P. 283–288.
4. Стельмах Л.В., Бабич И.И., Тугрул С., Мончева С., Стефанова К. Скорость роста фитопланктона и его выедание зоопланктоном в западной части Черного моря в осенний период // Океанология, 2009. – 49, № 1. – С. 90–100.
5. Юнев О.А., Берсенева Г.П. Флуориметрический метод определения концентрации хлорофилла *a* и феофитина *a* в фитопланктоне // Гидробиол. журн. – 1986. – 2, № 2. – С. 89–95.
6. Menden-Deuer S., Lessard E.J. Carbon to volume relationships for dinoflagellates, diatoms and other protist plankton // Limnol. Oceanogr. – 2000. – 45. – P. 569–579.
7. Методы гидрохимических исследований основных биогенных элементов. – М.: ВНИРО, 1988. – 119 с.
8. Klausmeier C.A., Litchman E. Phytoplankton growth and stoichiometry under multiple nutrient limitation // Limnol. Oceanogr. – 2004. – 49. – P. 1463–1470.
9. Стельмах Л.В. Сезонные изменения удельной скорости роста фитопланктона и его потребления микрозоопланктоном в прибрежных водах Черного моря / Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету. – 2010. – 44, № 3. – С. 268–271.