

Л. В. С Т Е Л Ь М А Х, И. И. Б А Б И Ч, С. Т У Г Р У Л

**ОТНОШЕНИЕ ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА К ХЛОРОФИЛЛУ “А”  
В ФИТОПЛАНКТОНЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД  
ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ В ПЕРИОД ОСЕННЕГО “ЦВЕТЕНИЯ”**

В сентябре – октябре 2005 г. в прибрежных водах Болгарии, Турции и на северо-западном шельфе у побережья Крыма отмечено интенсивное развитие диатомовых водорослей, что сопровождалось повышением концентрации хлорофилла “а” до  $2 - 5 \text{ мг/м}^3$ , тогда как в глубоководной области его содержание не превышало  $0,54 \text{ мг/м}^3$ . Показано, что отношение органического углерода к хлорофиллу “а” в нано- и микрофитопланктоне исследованных вод изменялось от 30 до 293. Установлено, что в данный период основным фактором, регулирующим пространственную изменчивость величины  $C/Xл“а”$ , является концентрация аммонийного азота.

Исследования, выполненные в последние 20 лет в различных районах Атлантического океана [5, 8, 9, 10, 11, 15] и в Черном море [1, 6, 7], показали, что отношение между органическим углеродом и хлорофиллом “а” ( $C/Xл“а”$ ) в фитопланктоне подвержено большой временной и пространственной изменчивости. Эта изменчивость связана, в основном, с приспособляемостью водорослей к внешним факторам, таким как свет, температура и питательные вещества, а также с генотипическими различиями в величине данного отношения у различных систематических групп. Анализ литературы [7, 9] и результаты собственных исследований [6] в прибрежных водах Черного моря позволяют заключить, что основным фактором, вызывающим сезонную изменчивость отношения  $C/Xл“а”$ , является свет.

Цель настоящей работы состояла в том, чтобы исследовать пространственную изменчивость отношения  $C/Xл“а”$  в нано- и микрофитопланктоне поверхностных вод западной части Черного моря в период осеннего развития диатомовых водорослей и выявить факторы, регулирующие ее.

**Материал и методы.** В основу работы положены экспериментальные исследования, выполненные в международной экспедиции на НИС “Владимир Паршин” в западную часть Черного моря с 28 сентября по 15 октября 2005 г. (рис. 1).

Воду отбирали с поверхности в утренние часы (7–8 ч) или после полудня (16–17 ч) для определения суммарной концентрации хл “а” в планктоне, концентрации хлорофилла в микро- и нанофитопланктоне, а также его видового состава и биомассы. Пробы объемом 5–6 л сгущали в воронке обратной фильтрации [4] с использованием нуклеопоровых фильтров с диаметром пор 2.5 мкм, где в результате был сконцентрирован фитопланктон, линейные размеры которого составляли 2.5 и более микрон (нано- и микрофитопланктон). Сгущенную пробу объемом 100 мл делили на две части, одну из которых фиксировали 4% 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 в жидком азоте до начала их обработки.

Видовой состав, численность и линейные размеры водорослей определяли в сгущенной капле объемом 0.1 мл в 3–5 повторностях под световым микроскопом МБИ-3 при общем увеличении  $\times 210$ . Средний объем клеток для отдельных видов водорослей определяли как отношение объема всех клеток к их численности. Содержание органического углерода рассчитывали по среднему объему клеток для определенных видов по уравнениям, приведенным в [12].

Для определения суммарной концентрации хлорофилла “а” в планктоне пробы воды объемом 1 л фильтровали через стекловолокнистые фильтры типа GF/F. Все

© Л. В. Стельмах, И. И. Бабич, С. Тугрул, 2006

фильтры с осевшей на них взвесью хранили в жидком азоте. Концентрацию хлорофилла определяли флюориметрическим методом, подробно описанным нами ранее [6].

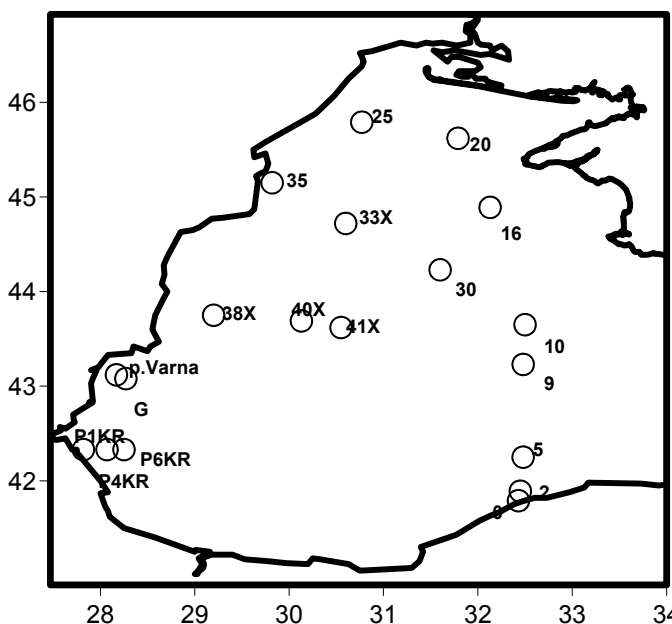


Рисунок 1. Расположение станций отбора проб в западной части Черного моря  
Figure 1. Location of sampling stations in the Western Black Sea

Измерения фосфатов, нитритов, нитратов и аммония выполнены с помощью стандартных методов [14].

Освещенность измеряли каждый час в течение светового дня с помо-

щью люксметра Ю-116. Переходный коэффициент от освещенности в люксах к интенсивности света (ФАР) принимали равным  $10^4 \text{ лк} = 200 \text{ мкЕ/м}^2 \cdot \text{с}$  [3].

**Результаты.** В исследованный период в поверхностном слое западной части Черного моря выявлена значительная неоднородность в распределении нитратов, нитритов, аммония и фосфатов. Наиболее высокие концентрации азотных соединений зарегистрированы в прибрежных водах Болгарии (ст. P1KR, P4KR, P6KR, 38X). Здесь содержание нитратов изменялось от 0.04 до 2.55 мкМ, составив в среднем 1.33 мкМ (табл. 1). На северо-западном шельфе (ст. 16, 20, 25, 33X, 35) концентрация нитратов изменялась почти в тех же пределах (от 0.05 до 3.22 мкМ), однако среднее значение этого показателя было почти в 2 раза ниже, чем у болгарского побережья. Низкое содержание нитратного азота наблюдалось в глубоководной области (ст. 9, 10, 30, 40X, 41X) и у берегов Турции (ст. 0, 2, 5), составив в среднем 0.11 и 0.07 мкМ соответственно.

Подобное распределение характерно и для нитритов, максимальные концентрации которых наблюдались у берегов Болгарии (в среднем 0.12 мкМ). Более низкие значения (в среднем 0.09 мкМ) отмечены на северо-западном шельфе. У берегов Турции содержание нитритов понижалось в среднем до 0.05 мкМ, а в глубоководной области - до 0.03 мкМ.

Определения концентрации аммонийного азота проводились на всей исследуемой акватории, за исключением болгарского побережья. Наиболее высокие концентрации этого вещества были получены на северо-западном шельфе, где они изменялись от 0.04 до 0.26 мкМ, в среднем 0.15 мкМ. Почти такие же концентрации аммония отмечены у берегов Турции, где достигли в среднем 0.14 мкМ, а в глубоководной области понизились почти в 2 раза.

Самые высокие концентрации фосфатов зарегистрированы на северо-западном шельфе. Здесь они изменялись от 0.02 до 0.39 мкМ, что в среднем составило 0.12 мкМ. У берегов Болгарии и в глубоководной области их значения были в 1.5 раза ниже. Минимальные величины (в среднем 0.03 мкМ) наблюдались у турецкого побережья.

Таблица 1. Содержание хлорофилла “а” в планктоне (мг/м<sup>3</sup>), величина отношения органического углерода к хлорофиллу “а” в нано- и микрофитопланктоне, относительная биомасса диатомовых водорослей (%) и концентрация основных питательных веществ (мкМ), в поверхностных водах западной части Черного моря в сентябре – октябре 2005 г.

Table 1. Chlorophyll “a” concentration in plankton (mg/m<sup>3</sup>), carbon-chlorophyll “a” ratio in nano- and microphytoplankton, relative biomass of Bacillariophyceae (%) and concentration of main nutrients (mkM) in the surface waters of the Western Black Sea during September – October 2005

| Хл “а”                                           | С/Хл “а”              | Б диат.            | PO <sub>4</sub>            | NO <sub>2</sub>            | NO <sub>3</sub>            | NH <sub>4</sub>            |
|--------------------------------------------------|-----------------------|--------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Северо-западная часть                            |                       |                    |                            |                            |                            |                            |
| 0.51 – 5.50<br>(1.80±2.12)                       | 30 – 259<br>(101±93)  | 36 – 77<br>(53±16) | 0.02 – 0.39<br>(0.12±0.16) | 0.01 – 0.27<br>(0.09±0.11) | 0.05 – 3.22<br>(0.72±1.40) | 0.04 – 0.26<br>(0.15±0.09) |
| Прибрежные воды у берегов Болгарии (около Варны) |                       |                    |                            |                            |                            |                            |
| 0.92 – 4.33<br>(2.09±1.29)                       | 31 – 230<br>(78±77)   | 44 – 92<br>(61±17) | 0.03 – 0.23<br>(0.08±0.08) | 0.01 – 0.23<br>(0.12±0.10) | 0.04 – 2.55<br>(1.33±1.19) | -                          |
| Прибрежные воды у берегов Турции                 |                       |                    |                            |                            |                            |                            |
| 2.48 – 5.40<br>(4.19±1.24)                       | 44 – 71<br>(63±13)    | 54 – 94<br>(80±18) | 0.02 – 0.04<br>(0.03±0.01) | 0.04 – 0.06<br>(0.05±0.01) | 0.03 – 0.10<br>(0.07±0.05) | 0.08 – 0.20<br>(0.14±0.08) |
| Глубоководная область                            |                       |                    |                            |                            |                            |                            |
| 0.39 – 0.57<br>(0.49±0.08)                       | 119 – 293<br>(215±81) | 56 – 90<br>(72±15) | 0.02 – 0.18<br>(0.08±0.08) | 0.01 – 0.05<br>(0.03±0.01) | 0.03 – 0.23<br>(0.11±0.08) | 0.05 – 0.10<br>(0.08±0.02) |

В период работ на всей исследованной акватории западной части Черного моря при температуре 19 – 20° С в фитопланктоне доминировали водоросли, относящиеся к Bacillariophyceae. Основными видами были *Cerataulina pelagica* (Cl.) Hend., *Proboscia alata* (Brightw.) Sundström, *Pseudo-nitzschia seriata* (Cl.) H. Perag., *Pseudosolenia calcar-avala* (M. Schultze) Sundström, *Chaetoceros curvisetus* Cl. и *Ch. socialis* Laud.

На северо-западном шельфе, где концентрация хлорофилла “а” составляла в среднем 1.80 мг.м<sup>-3</sup> при колебаниях от 0.51 до 5.50 мг.м<sup>-3</sup>, биомасса Bacillariophyceae изменялась от 36 до 77 % от общей биомассы нано- и микрофитопланктона, составив в среднем 53 % (табл. 1). В прибрежных водах у Варны получены более высокие значения содержания хлорофилла. Они изменялись от 0.92 до 4.33 мг.м<sup>-3</sup> (в среднем 2.09 мг.м<sup>-3</sup>). Здесь биомасса диатомовых видов составляла 44 – 92 %, достигая в среднем 60 % от суммарной биомассы нано- и микрофитопланктона. Самые высокие концентрации хлорофилла (в среднем 4.19 мг.м<sup>-3</sup>) отмечены на юге района работ в прибрежных водах Турции, где вклад Bacillariophyceae был максимальным и достигал в среднем 80 %. В глубоководной части моря доля Bacillariophyceae в суммарной биомассе нано- и микрофитопланктона также была высокой, составив в среднем 71 %. Однако содержание хлорофилла “а” в планктоне здесь было минимальным – 0.39 – 0.57 мг.м<sup>-3</sup>.

Самые низкие значения отношения С/Хл “а” отмечены в прибрежных водах Турции, составив в среднем 63, при колебаниях от 44 до 71. У берегов Болгарии данное отношение изменялось от 31 до 230, а его среднее значение повысилось до 78. На северо-западном шельфе отношение С/Хл “а” изменялось в тех же пределах, что и у болгарского побережья, достигнув в среднем 101. В глубоководной области получены самые высокие значения С/Хл “а”, составив в среднем 215, при колебаниях от 119 до 293.

Как следует из рис. 2а, отношение между органическим углеродом и хлорофиллом в клетках водорослей в данный период количественно не связано со светом, что обусловлено, вероятно, слабой пространственно-временной изменчивостью суммарной за день интенсивности солнечной радиации, падающей на поверхность моря. Что касается питательных веществ, то только между концентрацией аммония в среде и величиной С/Хл “а” наблюдается количественная связь, представленная в виде экспоненты (рис. 2б).

**Обсуждение.** Период наших работ совпал с осенним “цветением” диатомовых водорослей, обычно наблюдаемым в прибрежных водах Черного моря в это время [2, 6, 13].

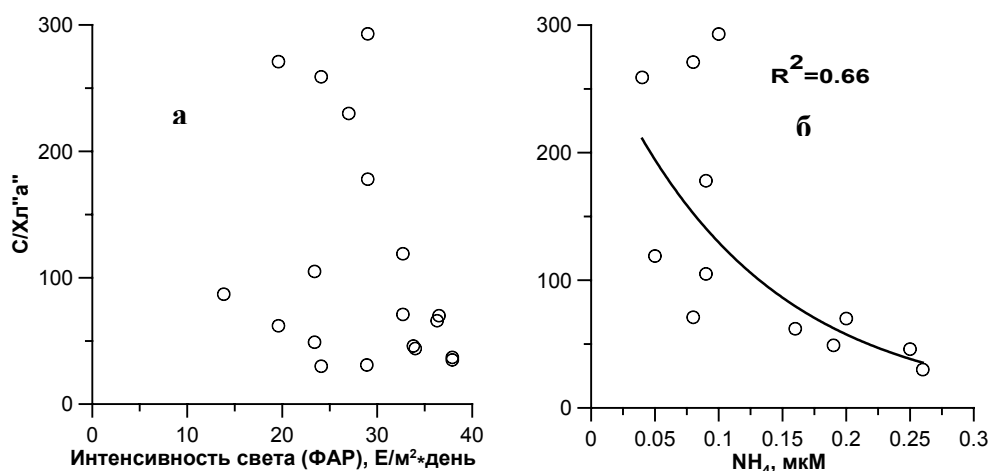


Рисунок 2. Зависимость отношения  $C/Chl\text{ "a"}$  от интенсивности света (а) и концентрации аммония (б) в исследованных водах

Figure 2. The dependence of  $C/Chl\text{ "a"}$  ratio from light intensity (a) and ammonium concentration (b) in investigated regions

Цветением были охвачены районы моря у берегов Болгарии, на северо-западном шельфе у реки Дунай и около западного побережья Крыма, а также у побережья Турции. В центре моря наблюдалось слабое развитие фитопланктона, однако его видовой состав был практически таким же, как и в прибрежных районах.

В условиях, при которых температура воды и суммарная за день интенсивность света, падающего на поверхность моря, изменялись слабо, а в фитопланктоне как прибрежных, так и глубоководных районов доминировали одни и те же виды водорослей, отмечена существенная пространственная изменчивость отношения органического углерода к хлорофиллу. Средние значения данного показателя в прибрежных водах были в 3 раза ниже, по сравнению с глубоководной областью. Это свидетельствует о более высокой степени обеспеченности фитопланктона прибрежных вод питательными веществами. Исследования, выполненные ранее в поверхностных водах западной и восточной частей Черного моря в летний период, также показали, что в теплое время года уровень биогенной обеспеченности фитопланктона в прибрежных водах выше, чем в глубоководных районах. В результате этого среднее значение  $C:Хл\text{ "a"}$  для прибрежного фитопланктона было в 2 раза ниже, по сравнению с величиной данного отношения для фитопланктона открытых вод [1].

Роль основных биогенных веществ в регуляции отношения  $C/Хл\text{a}$ , вероятно, неодинакова. В период наших работ только между концентрацией аммонийного азота и величиной  $C/Хл\text{a}$  получена количественная связь. Наличие экспоненциальной зависимости между этими параметрами позволяет заключить, что основное влияние на изменчивость отношения  $C/Хл\text{a}$  на исследованной акватории оказывал аммоний.

На основе анализа данных [6, 7, 9] и полученных результатов можно заключить, что отношение между органическим углеродом водорослей и хлорофиллом "а" очень изменчиво даже в пределах одного сезона. Поэтому для расчета биомассы фитопланктона на основе концентрации хлорофилла необходимо знать величину  $C/Хл\text{ "a"}$ .

**Выводы. 1.** В течение сентября – октября 2005 г. в прибрежных водах Черного моря у берегов Болгарии, Турции и у западного побережья Крыма наблюдалось цветение *Bacillariophyceae*. Основную биомассу создавали *C. pelagica*, *P. delicatissima*, *P. alata* и *P. seriata*. **2.** Самые высокие значения отношения  $C/Хл\text{ "a"}$  были получены в глубоководной части Черного моря – в среднем  $215 \pm 81$ , самые низкие величины – у побережья Турции, в среднем  $63 \pm 13$ . **3.** Основным фактором, регулирующим отношение  $C/Хл\text{ "a"}$

исследованных поверхностных водах Черного моря в сентябре – октябре 2005 г., был аммонийный азот.

1. Ведерников В. И., Микаэлян А. С. Структурно-функциональные характеристики разных размерных групп фитопланктона Черного моря // Структура и продукционные характеристики планктонных сообществ Черного моря. – М.: Наука, 1989. – С. 84 – 105.
2. Георгиева Л. В. Видовой состав и динамика фитоплана // Планктон Черного моря. – К.: Наук. думка, 1993. – С. 31 – 55.
3. Парсонс Т. Р., Такахаши М., Харгрей В. Биологическая океанография. – М.: Легкая и пищ. пром-сть, 1982. – С. 89 – 91.
4. Сорокин Ю. И., Суханова И. Н., Коновалова Г. В. и др. Первичная продукция и фитопланктон района экваториальной дивергенции в восточной части Тихого океана // Тр. ИО АН СССР. – 1975. – **102**. – С. 108 – 122.
5. Стельмах Л. В., Лобанова Р. А. Соотношение углерод–хлорофилл “а” в фитопланктоне поверхностных вод Восточно-тропической Атлантики // Экология моря. – 1993. – Вып. 43. – С. 15 – 20.
6. Стельмах Л. В., Бабич И. И. Сезонные изменения отношения органического углерода к хлорофиллу “а” в фитопланктоне прибрежных вод Черного моря в районе Севастополя // Океанология. – 2003. – **43**, № 6. – С. 875 – 884.
7. Финенко З. З., Чурилова Т. Я., Ли Р. И. Вертикальное распределение хлорофилла и флуоресценции в Черном море // Морск. экол. журн. – 2005. – **4**, №1. – С. 15 – 45.
8. Buck K. R., Chavez F. P., Campbell L. Basin-wide distributions of living carbon components and the inverted trophic pyramid of the central gyre of the North Atlantic Ocean, summer 1993 // Aquat. Microb. Ecol. – 1996. – **10**. – P. 283 – 298.
9. Goericke R., Welschmeyer N. A. Response of Sargasso Sea phytoplankton biomass, growth rates and primary production to seasonally varying physical forcing // J. Plankton Res. – 1998. – **20**. – № 12. – P. 2223 – 2249.
10. Maranon E., Holligan P. M., Varela M., Mourino B., Bale A. J. Basin- scale variability of phytoplankton biomass, production and growth in the Atlantic Ocean // Deep-Sea Res. – 2000. – **47**. – P. 825 – 857.
11. Maranon E. Phytoplankton growth rates in the Atlantic subtropical gyres // Limnol. Oceanogr. – 2005. – **50**. – P. 299 – 310.
12. Menden-Deuer S., Lessard E. J. Carbon to volume relationships for dinoflagellates, diatoms and other protist plankton // Limnol. Oceanogr. – 2000. – **45**. – P. 569 – 579.
13. Nesterova D. A. Phytoplankton blooms: Black Sea Biological Diversity Ukraine // Ukrainian National Report. – New York, United Nat. Publ., 1998. – P. 95 – 100.
14. Parsons T. R., Maita Y., Lalli C. M. // A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis. – Oxford, Pergamon Press, 1984. – 173 p.
15. Veldhuis M. J. W., Kraay G. W. Phytoplankton in the subtropical Atlantic ocean: towards a better assessment of biomass and composition // Deep-Sea Res. – 2004. – **51**. – P. 507 – 530.

<sup>1</sup> Институт биологии южных морей НАН Украины, г. Севастополь

<sup>2</sup> Институт морских наук, Ближневосточный Технический Университет,  
г. Эрдемли, Турция

Получено 29.06.2006

L. V. STELMAKH, I. I. BABICH, S. TUGRUL

**ORGANIC CARBON TO CHLOROPHYLL A RATIO IN THE PHYTOPLANKTON  
OF THE SURFACE WATERS OF THE WESTERN BLACK SEA DURING AUTUMN BLOOM**  
**Summary**

In September – October 2005 the near-shore bloom of Bacillariophyceae was registered almost all over of the western Black Sea. *C. pelagica*, *P. delicatissima*, *P. alata* and *P. seriata* dominated in the phytoplankton biomass. Carbon to chlorophyll *a* ratio in the nano- and microphytoplankton of the surface waters varied from 30 to 295. Main factor, regulated this ratio was ammonium.