

Л. В. СТЕЛЬМАХ, М. И. СЕНИЧЕВА, И. И. БАБИЧ

**ЭКОЛОГО-ФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ “ЦВЕТЕНИЯ” ВОДЫ,
ВЫЗЫВАЕМОГО *EMILIANA HUXLEYI* В СЕВАСТОПОЛЬСКОЙ БУХТЕ**

Представлены результаты исследований сезонной динамики численности кокколитофориды *Emiliana huxleyi* в Севастопольской бухте за период с 2003 по 2007 гг. Ежегодно в июне она достигала уровня “цветения”. Обсуждаются возможные причины этого явления, приводится их экспериментальное подтверждение.

В последние двадцать лет на обширных акваториях различных районов Мирового океана периодически регистрируется массовое развитие кокколитофориды *Emiliana huxleyi* (Lohmann) Hay & Mohler 1967 [1, 4, 10]. В Чёрном море этот вид водорослей достигает уровня “цветения” в разные сезоны года [1, 4]. Однако причины, вызывающие это явление, до настоящего времени окончательно не выяснены.

Цель настоящей работы состояла в исследовании сезонной динамики численности *Emiliana huxleyi* и выявлении основных факторов, определяющих массовое развитие этого вида в прибрежных водах Чёрного моря на примере Севастопольской бухты.

Материал и методы. Сезонная динамика численности фитопланктона поверхностных вод Севастопольской бухты изучалась в 2003 – 2007 гг. Пробы морской воды отбирали с поверхности моря один – три раза в месяц в утренние часы (8 – 12 ч).

Количество клеток *Emiliana huxleyi* учитывали в “живой” капле негущённой воды. Затем пробы объёмом 1,5 л сгущали на ядерных фильтрах с размером пор 1 мкм в воронке обратной фильтрации. В полученном концентрате (50 – 70 мл) определяли видовой состав и учитывали количество клеток всего фитопланктона с использованием светового микроскопа [4].

Для исследования стимулирующего влияния диатомовых водорослей *Chaetoceros socialis* Laud. и *C. curvisetus* Cl. на рост альгологически чистой культуры *E. huxleyi* использовали водные экстракты из живых клеток этих видов, которые выделяли по методике [5]. Эксперименты осуществляли при непрерывном искусственном освещении лампами дневного света ЛД-40. Интенсивность света составляла $200 \text{ мкЭ} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, а температура – $20 - 22^\circ\text{C}$.

Данные по концентрации основных биогенных веществ в Севастопольской бухте любезно предоставлены нам Е. А. Куфтарковой (отдел марикультуры и прикладной океанологии ИнБЮМ).

Результаты. Полученные результаты свидетельствуют о том, что в течение года численность *E. huxleyi* в Севастопольской бухте изменялась в широком диапазоне: от 0 до $1.300 - 2.962 \text{ млн. кл.л}^{-1}$ (рис. 1). Первый сезонный максимум вида в 2006 г. был зарегистрирован в январе ($0.8 \text{ млн. кл. л}^{-1}$), а в 2003 и 2007 гг. – в феврале (0.5 и $0.7 \text{ млн. кл. л}^{-1}$ соответственно). В это время в бухте преобладал речной сток, солёность снижалась до $17.47 - 16.78 \text{ ‰}$, отмечался дефицит фосфатов и снижалось количественное развитие диатомеи *Skeletonema costatum* (Grev.) Cl. В 2004 и 2005 гг. зимнего увеличения численности *E. huxleyi* не отмечено.

Второй, основной максимум численности *E. huxleyi* ($1.30 - 2.96 \text{ млн. кл.л}^{-1}$) наблюдался во все годы в июне после апвеллинга. Температура воды на поверхности составляла $17 - 22^\circ\text{C}$, а в придонном слое – $9 - 14^\circ\text{C}$, что было обусловлено адвекцией глубинных морских вод в бухту. В июне 2003 и 2005 гг. в Севастопольской бухте зарегистрированы: максимальная концентрация фосфатов (табл. 1), спад количественного разви-

© Л. В. Стельмах, М. И. Сеничева, И. И. Бабич, 2009

тия мелкоклеточной диатомеи *C. socialis* и вспышка развития *E. huxleyi*, составлявшей 44 – 48% суммарной численности фитопланктона.

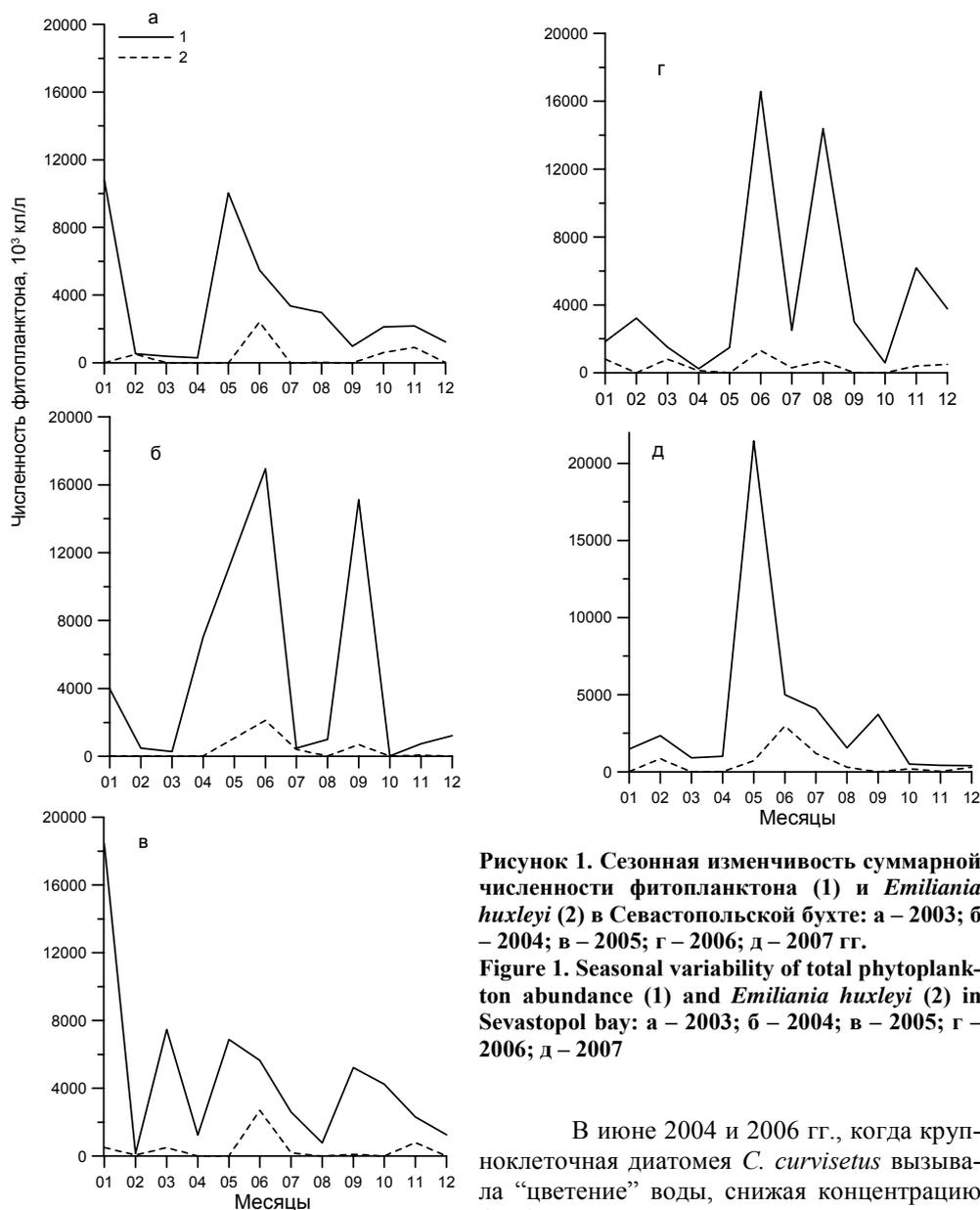


Рисунок 1. Сезонная изменчивость суммарной численности фитопланктона (1) и *Emiliana huxleyi* (2) в Севастопольской бухте: а – 2003; б – 2004; в – 2005; г – 2006; д – 2007 гг.

Figure 1. Seasonal variability of total phytoplankton abundance (1) and *Emiliana huxleyi* (2) in Sevastopol bay: а – 2003; б – 2004; в – 2005; г – 2006; д – 2007

huxleyi составляла 12 и 8 % суммарной численности. В июне 2004 и 2006 гг., когда крупноклеточная диатомея *C. curvisetus* вызывала “цветение” воды, снижая концентрацию фосфатов до минимального значения, *E. huxleyi* достигала максимальных значений.

Третий, осенний пик численности *E. huxleyi*, также связанный с апвеллингом, наблюдался в сентябре – ноябре ($0.4 - 0.9$ млн. кл./л⁻¹) в период развития диатомовых водорослей *S. costatum*, *Cerataulina pelagica* (Cleve) Hendeу и видов из рода *Chaetoceros*.

Расчёты показали, что основную долю годовой биомассы фитопланктона (49 – 93 %) создавали диатомовые водоросли. На долю динофитовых приходилось от 2.3 до

5.9% от суммарной биомассы фитопланктона. Практически такой же вклад в фитопланктонную биомассу вносили и примезиевые (2.3 – 6.9%), в основном *E. huxleyi*.

Год	Ч, млн. кл/л	T, град. С	Si, мкМ	NO ₃ , мкМ	NH ₄ , мкМ	PO ₄ , мкМ	N/P
2003	2.400	21.4	6.14	7.40	0.56	0.86	9
2004	2.122	19.0	12.6	0.01	0.36	<0.01	>36
2005	2.700	21.4	3.71	0.74	0.26	0.21	5
2006	1.300	20.0	1.50	3.11	0.99	0.08	51
2007	2.962	22.0	2.00	1.74	0.48	0.04	55

Таблица 1 Численность *E.huxleyi* (Ч) и гидрохимические условия в период ее “цветения” в Севастопольской бухте
Table 1 Abundance of *E.huxleyi* (Ч) and hydrochemical conditions in the period of its “bloom” in Sevastopol bay

На рис. 2 представлен рост *E. huxleyi* в накопительной культуре. На среде f/2 (контроль) водоросли достигали стационарной фазы роста на 8-й день, когда концентрация клеток составила 20 млн. кл. л⁻¹. На среде f/2 с добавлением экстрактов из живых клеток *C. curvisetus* культура этой кокколитофориды росла более интенсивно и к началу стационарной фазы её численность достигла 30 млн. кл. л⁻¹. На среде f/2 с добавлением экстрактов *C. socialis* в стационарной фазе роста получена максимальная численность *E. huxleyi*, которая была в 2 раза выше, чем в контроле (40 млн. кл. л⁻¹).

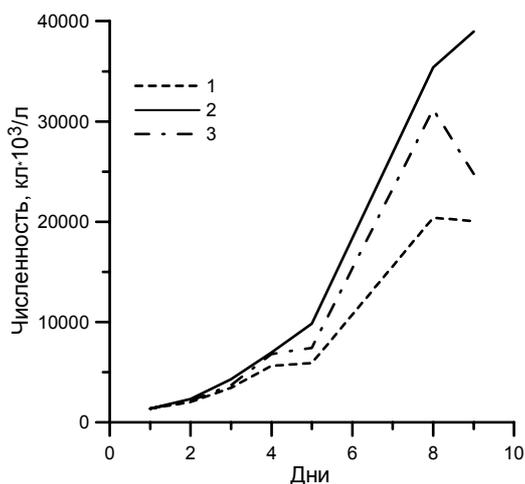


Рисунок 2. Рост *Emiliana huxleyi*: 1 - среда f/2; 2 - среда f/2 с добавлением экстрактов из клеток *Chaetoceros socialis*; 3 - среда f/2 с добавлением экстрактов из клеток *C. curvisetus*
Figure 2. The growth of *Emiliana huxleyi*: 1 – f/2 media; 2 - f/2 media with addition of extract from cells of *Chaetoceros socialis*; 3 - f/2 media with addition of cells extract of *C. curvisetus*

Обсуждение. Многолетними наблюдениями за динамикой развития фитопланктона в Чёрном море показано, что в тёплый период года максимальное количество *E. huxleyi* сконцентрировано у верхней границы слоя сезонного термоклина, где её численность увеличивалась после сгонных процессов. В холодный период количество клеток этого вида возрастало в верхнем слое моря в результате интенсивного конвективного перемешивания и подъёма к поверхности глубинных вод, обогащённых фосфатами. Высоким содержанием минеральных фосфатов было вызвано, вероятно, массовое развитие диатомеи *Skeletonema costatum* и кокколитофориды *E. huxleyi* на всей акватории Чёрного моря весной в 50-х годах прошлого столетия [4].

В Севастопольской бухте зимний (2006 г.), ранневесенние (2003 и 2006 гг.) и летние (2006 и 2007 г.) максимумы численности *E. huxleyi* наблюдались в периоды дефицита минерального фосфора и повышенного содержания растворённого органического вещества, поступающего как с речным стоком, так и с метаболитами диатомовых водорослей на завершающей стадии их развития [4]. Исследования, выполненные на культуре *E. huxleyi*, показали наличие у этого вида ферментов, способных

трансформировать органические вещества в минеральные [11]. Поэтому, вероятно, при дефиците минерального фосфора *E. huxleyi* способна переходить на миксотрофное питание, чем объясняется её массовое развитие во всем эвфотическом слое Чёрного моря в 90-е годы прошлого столетия [4]. Способность *E. huxleyi* к миксотрофному питанию подтверждается ослаблением или полным отсутствием люминесценции её клеток, а также результатами экспериментов по стимулированию роста культуры данного вида экстрактами из клеток *C. curvisetus* и *C. socialis*, играющих определяющую роль в развитии “цветений” в Севастопольской бухте. Ранее нами экспериментально было показано также стимулирующее влияние экстрактов диатомовых водорослей *Skeletonema costatum*, *C. socialis* и *C. curvisetus* на рост динофлагеллаты *Prorocentrum micans* Ehr [5].

Обладая малыми линейными размерами (6 – 11 мкм), *E. huxleyi* может достигать максимального роста даже при очень низких концентрациях биогенных веществ в среде. Константа полунасыщения (K_s), определённая по скорости роста, для нитратов у *E. huxleyi* составила 0.1 мкМ [7], тогда как их концентрация в Севастопольской бухте в период “цветения”, вызванного этим видом, часто значительно выше. Содержание фосфатов в воде часто было равно или превышало расчётные значения K_s (менее 0.01 мкМ). Соотношение между минеральными соединениями азота и фосфора (N:P) в период “цветения” в различные годы было неодинаковым и изменялось от 5 до 55 (табл. 1).

Уровня “цветения” в бухте (более 1 млн. кл. · л⁻¹) *E. huxleyi* достигает только в июне. В это время складываются наиболее благоприятные световые и температурные условия для ее развития.

Экспериментальные исследования на культуре данного вида показали, что оптимальная температура для её роста была равна 20⁰ С [6]. Световое насыщение скорости роста *E. huxleyi* в 3 – 4 раза выше, чем у диатомовых и динофитовых водорослей и составляло 400 – 600 мкЭ · м⁻² · с⁻¹ [8, 10]. Именно такие температурные и световые условия имеют место в поверхностных водах Севастопольской бухты в июне.

Известно, что развитие “цветения” фитопланктона возможно лишь в том случае, если скорость роста водорослей значительно превышает скорость их потребления консументами. Для *E. huxleyi* характерны высокие скорости роста (2 – 4 сутки⁻¹), полученные как в экспериментах на культурах [6,8], так и в море [2], а также низкие скорости выедания микрзоопланктоном [9]. Однако отмечено активное потребление этой водоросли мезозоопланктоном, личинками рыб и моллюсками-фильтраторами [4]. Несмотря на это, высокие скорости роста *E. huxleyi* позволяют ей достигать массового развития в море.

Заключение. В период с 2003 по 2007 гг. массовое развитие *E. huxleyi* в Севастопольской бухте, вызывающей “цветение” воды, наблюдалось только в июне, после сильных сгонных процессов. В это время для неё складывались благоприятные условия по свету, температуре и биогенным веществам. В зимний, ранневесенний и летний периоды при дефиците фосфатов, *E. huxleyi*, вероятно, может использовать органические вещества, поставляемые как речными водами, так и метаболитами диатомовых водорослей на завершающей стадии их развития. Высокие скорости роста, характерные для *E. huxleyi* позволяют ей, несмотря на активное потребление мезозоопланктоном, молодью рыб и моллюсками, достигать уровня “цветения” (1,30 – 2,96 млн. кл. л⁻¹).

1. Паутова Л. А., Микаэлян А. С., Силкин В. А. Структура планктонных фитоценов шельфовых вод северо-восточной части Чёрного моря в период массового развития *Emiliania huxleyi* в 2002 – 2005 гг. // Океанология. – 2007. – 47, № 3. – С. 408 – 417.
2. Сеничева М. И. Сезонная динамика численности, биомассы и продукции фитопланктона Севастопольской бухты // Экология моря. – 1980. – Вып. 1. – С. 3 – 11.
3. Сеничева М. И. Годичные изменения фитопланктонного сообщества в районе Севастопольского океанариума // Экология моря. – 2000. – Вып. 53. – С. 13 – 19.

4. *Сеничева М. И.* Видовое разнообразие, сезонная и межгодовая изменчивость микроводорослей в планктоне у берегов Крыма / Токарев Ю. Н., Финенко З. З., Шадрин Н. В. Микроводоросли Чёрного моря: проблемы сохранения биоразнообразия и биотехнологического использования. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008.- С. 5 – 17.
5. *Стельмах Л. В., Галатонова О. А., Бабич И. И.* Культивирование водорослей в лабораторных условиях / Под ред. Токарева Ю. Н., Финенко З. З., Шадрина Н. В. Микроводоросли Чёрного моря: проблемы сохранения биоразнообразия и биотехнологического использования. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. – С. 186 – 200.
6. *Buitenhuis E. T., Pangerc T., Franklin D. J.* et al. Growth rates of six coccolithophorid strains as a function of temperature // *Limnol. Oceanogr.* – 2008. - **53**, N 3. – P. 1181–1185.
7. *Eppley R. W., Rogers J. N., McCarthy J. J.* Half-saturation constants for uptake of nitrate and ammonium by marine phytoplankton // *Limnol. Oceanogr.* - 1969. – **14**. – P. 912 - 918.
8. *Harris G., Scanlan D., Geider R.* Acclimation of *Emiliana huxleyi* (Prymnesiophyceae) to photon flux density // *J. Phycol.* - 2005. – **41**. – P. 851- 857.
9. *Strom S., Wolfe G., Holmes J.* et al. Chemical defense in the microplankton I: Feeding and growth rates of heterotrophic protists on the DMS-producing phytoplankter *Emiliana huxleyi* // *Limnol. Oceanogr.* - 2003. – **48**, N 1. – P. 217–229.
10. *Tyrrell, T., Merico, A.* *Emiliana huxleyi*: bloom observations and the conditions that induce them / Thierstein, H.R., Youngs, J.R. *Coccolithophores - From Molecular Processes to Global Impact.* - Springer, 2004. - P. 75–97.
11. *Xu Y., Wahlund T.M., Feng L.* et al. A novel alkaline phosphatase in the coccolithophore *Emiliana huxleyi* (Prymnesiophyceae) and its regulation by phosphorus // *J. Phycol.* - 2006. – **42**. – P. 835 – 844.

Институт биологии южных морей НАН Украины,
Севастополь, Украина

Получено 20 апреля 2009 г.

Л. В. СТЕЛЬМАХ, М. І. СЕНІЧЕВА, І. І. БАБІЧ

**ЕКОЛОГО-ФІЗІОЛОГІЧНІ ОСНОВИ “ЦВІТІННЯ” ВОДИ,
ЯКЕ ОБУМОВЛЕНО *EMILIANA HUXLEYI* У СЕВАСТОПОЛЬСЬКІЙ БУХТІ**

Представлено результати досліджень сезонної динаміки кількості *Emiliana huxleyi* у Севастопольській бухті за період з 2003 по 2007 рр. Щороку в червні спостерігали “цвітіння” води, яке обумовлено цією кокколитофориною. Обговорюються можливі причини цього явища та дається їх експериментальне підтвердження.

L. V. STELMAKH, M. I. SENICHEVA, I. I. BABICH

**ECOLOGICAL AND PHYSIOLOGICAL BASES OF *EMILIANA HUXLEYI* “BLOOM”
IN SEVASTOPOL BAY**

Summary

The results of studies of seasonal dynamics of *Emiliana huxleyi* in Sevastopol Bay during the period from 2003 to 2007 are given. Every year in June "bloom" of this coccolithophorid was observed. Possible causes of this phenomenon and their experimental confirmation are discussed.