



УДК 582.26/.27(262.5)

Л. В. Стельмах, к. б. н., ст. н. с

Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского Национальной академии наук Украины, Севастополь, Украина

## УДЕЛЬНАЯ СКОРОСТЬ РОСТА ФИТОПЛАНКТОНА В ГЛУБОКОВОДНОЙ ЧАСТИ ЧЁРНОГО МОРЯ В РАЗЛИЧНЫЕ СЕЗОНЫ ГОДА

На основе первичных результатов, представленных в базе данных отдела экологической физиологии водорослей ИнБИОМ НАН Украины и международной базе данных NATO-TU BLACK SEA, а также собственных результатов выполнены расчёты удельной скорости роста фитопланктона по суточному приросту биомассы фитопланктона для глубоководной части Чёрного моря. Сезонные изменения этого параметра обусловлены комплексным действием факторов среды и различиями в таксономической структуре фитопланктона.

**Ключевые слова:** фитопланктон, удельная скорость роста, Чёрное море

Оценка скорости роста морского фитопланктона крайне необходима для понимания процессов, контролирующих пространственно-временные изменения первичной продукции и биомассы фитопланктона, биохимические циклы углерода, азота и фосфора, а также трансформацию вещества и энергии на высшие трофические уровни.

Исследования скорости роста черноморского фитопланктона выполнялись преимущественно в прибрежных водах [1, 2, 5, 6]. Поэтому до настоящего времени трудно ответить на вопрос: какова изменчивость этого показателя в глубоководных районах моря, и какие факторы её определяют.

Цель настоящей работы – оценить пределы изменчивости удельной суточной скорости роста фитопланктона в глубоководной части Чёрного моря в различные сезоны года и выявить основные факторы, регулирующие эту изменчивость.

**Материал и методы.** Расчёты удельной скорости роста фитопланктона проводили на основе данных одновременных определений первичной продукции и биомассы фитопланктона или концентрации хлорофилла "а", вы-

полненных в 10 океанографических рейсах в Чёрном море в период с января 1988 по октябрь 2005 гг. (табл. 1).

Для каждой станции в пределах зоны фотосинтеза (4 – 6 горизонтов) осуществляли расчёты суточной удельной скорости роста фитопланктона ( $\mu$ ) по формуле:

$$\mu = \ln(B_0 + PP) - \ln(B_0),$$

где  $B_0$  – начальная биомасса фитопланктона, мг С.м<sup>-3</sup>, PP – суточная первичная продукция, мг С.м<sup>-3</sup>.

Первичную продукцию определяли стандартным радиоуглеродным методом [7]. Для перехода от сырой биомассы фитопланктона к биомассе, выраженной в углеродных единицах, использовали коэффициенты, полученные нами ранее для различных систематических групп водорослей, представленных в планктоне [3].

Прямые определения биомассы фитопланктона, выполненные одновременно с измерениями первичной продукции, представлены в базе данных только для февраля и июля 1992 г., а также апреля 1993 г. В тех случаях, когда такие сведения отсутствовали, расчёты

фитопланктонной биомассы осуществляли по концентрации хлорофилла "а". В качестве переходного коэффициента от концентрации данного пигмента к биомассе, выраженной в углеродных единицах, использовали отношение органического углерода к хлорофиллу (С:Хл «а»).

Величину отношения С:Хл "а" для различных сезонов года рассчитывали на основе данных одновременных определений биомассы фитопланктона и хлорофилла, полученных в 5

научных экспедициях: в 15 и 21-м рейсах нис «Витязь», 33 и 37-м рейсах нис «Профессор Водяницкий» и экспедиции на нис «Vilim» в июне 1996 г. (табл. 1). Для декабря и января использовали данные по величине С:Хл "а", полученные в прибрежных водах [3].

Методики определения биомассы фитопланктона, концентрации хлорофилла "а" и содержания основных биогенных веществ в воде изложены в [9].

Табл. 1 Краткая характеристика данных, использованных для расчётов удельной скорости роста фитопланктона в глубоководной области Чёрного моря

Table 1 Brief characteristic of the data used for calculations of specific phytoplankton growth rate in deep-water of the Black Sea

Месяц	Год	Число станций	Рейс	Источник
Декабрь	1994	8	ПК-32*	Собственные результаты и международная база данных [8]
Январь	1988	5	ПВ-25	База данных отдела ЭФВ ИнБЮМ
Февраль	1991	8	ВИТ-21	База данных отдела ЭФВ ИнБЮМ
	1992	4	ПВ-36	и международная база данных
Март (ЗЦК)	1988	17	МЛ-49	База данных отдела ЭФВ ИнБЮМ
		3	ВИТ-15	и международная база данных
Март (вне ЗЦК)	1988	20	МЛ-49	База данных отдела ЭФВ ИнБЮМ
		8	ВИТ-15	и международная база данных
Апрель	1993	6	ПВ-41	Собственные результаты и международная база данных
Июнь	1989	29	ПВ-28	База данных отдела ЭФВ ИнБЮМ
	1991	6	ПВ-33	и международная база данных
	1996	5	«Vilim»	
Июль	1992	8	ПВ-37	Собственные результаты и международная база данных
Октябрь	2005	5	ВП	Собственные результаты и [4]

\* Научно-исследовательские суда: ПВ – «Профессор Водяницкий», ПК – «Профессор Колесников», МЛ – «Михаил Ломоносов», ВИТ – «Витязь» ИО РАН, ВП – «Владимир Паршин». ЗЦК – западный циклонический круговорот.

**Результаты.** В холодный период года (с декабря по апрель) концентрация минерального фосфора в зоне фотосинтеза изменялась в среднем от 0.07 мкМ в декабре до 0.15 мкМ в апреле (табл. 2). Данные по концентрации растворённого кремния представлены только для декабря и апреля. В декабре его содержание в поверхностных водах составило в среднем 2.57 мкМ, тогда как в апреле оно было приблизительно в 3 раза выше декабрьского показателя (в среднем для зоны фотосинтеза 8.70 мкМ).

Содержание нитратов повышалось от декабря к февралю в среднем от 0.14 до 0.40 мкМ, а к апрелю снижалось до 0.03 мкМ. В это время года наиболее благоприятные световые условия для роста микроводорослей наблюдались в слое 0 – 5 м. Однако в декабре в этом слое удельная скорость роста была невысокой, достигнув в среднем 0.15 сут<sup>-1</sup>. В период с января по март, когда было отмечено интенсивное развитие диатомовых водорослей (зимне-весеннее «цветение» воды), её средние

значения находились в диапазоне от 0.49 до 0.54 сут<sup>-1</sup>, тогда как в апреле вновь снижались до 0.24 сут<sup>-1</sup>.

Среднее для зоны фотосинтеза значение удельной скорости роста в январе составило 0.26 сут<sup>-1</sup>, в феврале – 0.20 сут<sup>-1</sup>, а в марте

в западном циклоническом круговороте достигло максимума и составило 0.36 сут<sup>-1</sup>. В апреле этот показатель в зоне фотосинтеза снизился до минимальных величин, составив 0.13 сут<sup>-1</sup>.

Табл. 2 Средние для зоны фотосинтеза значения содержания питательных веществ и удельной скорости роста фитопланктона ( $\mu_{\text{сред.}}$ ), а также скорость роста фитопланктона в поверхностном слое ( $\mu_{\text{макс.}}$ ) глубоководной области Чёрного моря

Table 2 Mean values of nutrient concentration and specific phytoplankton growth rate in photosynthetic zone and phytoplankton growth rate in the surface layer ( $\mu_{\text{макс.}}$ ) of deep-water of the Black Sea

Месяц	PO <sub>4</sub> , мкМ	Si, мкМ	NO <sub>3</sub> , мкМ	C:Хл <sup>а</sup> ”	$\mu_{\text{макс.}}$ , сут <sup>-1</sup>	$\mu_{\text{сред.}}$ , сут <sup>-1</sup>
Декабрь	0.07±0.12	2.57±2.46	0.14±0.10	70±20	0.15±0.06	-
Январь	0.06±0.04	-	-	40±5	0.49±0.09	0.26±0.04
Февраль	0.05±0.02	-	0.40±0.38	40±14	0.49±0.08	0.20±0.05
Март (ЗЦК)	0.11±0.05	-	0.30±0.24	40±14	0.54±0.11	0.36±0.08
Март (вне ЗЦК)	-	-	-	40±14	0.54±0.08	0.30±0.05
Апрель	0.15±0.09	8.70±2.60	0.03±0.04	112±34	0.24±0.10	0.13±0.06
Июнь	0.06±0.10	4.47±2.87	-	104±77	0.57±0.11	0.36±0.07
Июль	-	-	0.14±0.10	156±90	0.20±0.15	0.13±0.16
Сентябрь-Октябрь	0.08±0.08	0.21±0.16	0.13±0.06	215±81	0.29 ±0.07	-

Удельная скорость роста фитопланктона при оптимальных условиях освещения количественно связана с концентрацией нитратов в воде. Эта связь может быть описана с помощью уравнения Михаэлиса-Ментен (рис. 1). Из

уравнения следует, что в глубоководной области максимально возможная скорость роста фитопланктона в холодный период составила 0.74 сут<sup>-1</sup>, а константа полунасыщения роста ( $K_s$ ) по нитратам – 0.15 мкМ.

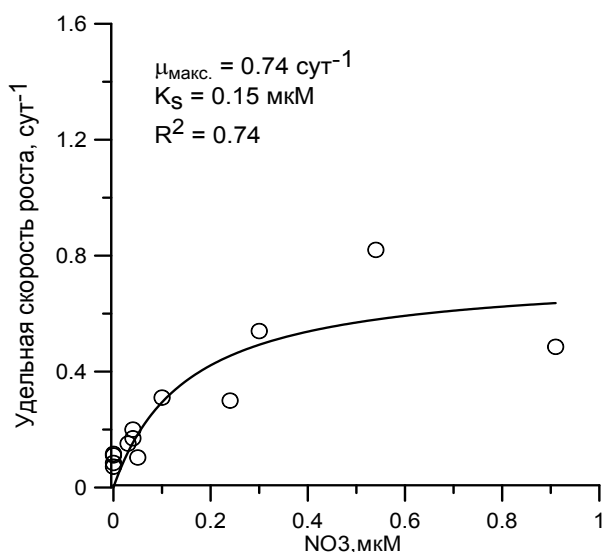


Рис. 1 Связь удельной скорости роста фитопланктона с концентрацией нитратов в слое 0 – 5 м глубоководной области Чёрного моря в холодный период  
Fig. 1 Relationship between specific phytoplankton growth rate and nitrate concentration in 0 – 5 m layer of deep-water of the Black Sea in cold period

В тёплый период года (с июня по октябрь) средние концентрации фосфатов в зоне фотосинтеза были практически такими же, как и в холодный период, составив в июне 0.06 мкМ, а в октябре 0.08 мкМ. Что касается кремния, то его содержание в зоне фотосинтеза в начале лета (в июне) было сравнительно высоким (в среднем 4.47 мкМ), тогда как осенью (в октябре) в водах глубоководной части Чёрного моря концентрация кремния снижалась в среднем до 0.21 мкМ. Средние концентрации нитратов, которые измеряли только в июле и октябре, были невысокими (0.14 и 0.13 мкМ соответственно).

В тёплый период года наиболее благоприятные световые условия для роста фитопланктона имели место в слое 0 – 10 м. Здесь самые высокие скорости роста, составившие в среднем  $0.57 \text{ сут}^{-1}$ , получены в июне, когда в планктоне доминировали мелкие формы динофитовых водорослей. Самые низкие значения (в среднем  $0.20 \text{ сут}^{-1}$ ) отмечены в июле на завершающей стадии «цветения» воды, вызванного интенсивным развитием кокколитофориды *Emiliania huxleyi*. Промежуточные величины (в среднем  $0.29 \text{ сут}^{-1}$ ), наблюдались в октябре. Среднее для зоны фотосинтеза значение скорости роста в июне составило  $0.36 \text{ сут}^{-1}$ , тогда как в июле снизилось до  $0.13 \text{ сут}^{-1}$ .

**Обсуждение.** Известно, что к основным факторам среды, определяющим скорость роста фитопланктона, относятся температура, свет и биогенные вещества.

В холодный период года средняя температура воды в зоне фотосинтеза глубоководной части Чёрного моря варьировала в относительно узких пределах: от  $6.2^{\circ} \text{C}$  в феврале до  $9.4^{\circ} \text{C}$  в декабре. Фотосинтетически активная радиация (ФАР), падающая на поверхность моря, в декабре обычно составляла  $3 - 4 \text{ Э} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$ , а к марту – апрелю возрастала до  $12 - 15 \text{ Э} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$  [5]. В этих условиях самые низкие величины удельной скорости роста фитопланктона получены в декабре и апреле. Они были в 3 – 5 раз ниже максимально возможной для холодного периода удельной скорости роста, рассчи-

танной нами по уравнению Михаэлиса-Ментен. Основной причиной таких низких значений в декабре, вероятно, являлся недостаток света. В апреле, когда свет и такие биогенные вещества, как фосфаты и растворённые формы кремния, не лимитировали рост фитопланктона, основной причиной снижения скорости роста являлось, вероятно, крайне низкое содержание нитратов в воде (в среднем 0.03 мкМ). Последнее обстоятельство обусловило также смену видового состава фитопланктона: наблюдался переход от диатомовых видов водорослей к динофитовым, которые предпочитают аммонийную форму азота.

Самые высокие значения удельной скорости роста для холодного периода отмечены в марте, когда в результате усиления циклонической циркуляции в центре моря поступление питательных веществ в зону фотосинтеза было максимальным. В результате этого зимне-весеннее «цветение» воды, вызванное диатомовыми водорослями, достигало своего наибольшего развития. Среднее значения скорости роста в поверхностном слое составило 73 % от рассчитанной максимально возможной величины для холодного периода, что свидетельствует о высоком уровне биогенной обеспеченности фитопланктона.

В тёплый период года температура воды в слое 0 – 10 м, в котором осуществлялся основной рост фитопланктона, составляла  $17 - 23^{\circ} \text{C}$ , а суммарная за день ФАР, падающая на поверхность моря, находилась в основном в диапазоне от 20 до  $50 \text{ Э} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$  [5]. В это время в условиях, благоприятных по свету и температуре, наибольшие величины удельной скорости роста фитопланктона, достигавшие в отдельных случаях  $0.7 - 0.8 \text{ сут}^{-1}$ , наблюдались в июне, когда в планктоне доминировали мелкие формы динофитовых водорослей. Такие скорости роста близки к максимально возможным значениям для данной группы водорослей, а, следовательно, биогенные вещества не лимитировали их рост. В течение октября в глубоководной западной части Чёрного моря основную биомассу фитопланктона снова

создавали диатомовые водоросли. Удельная скорость роста фитопланктона была в среднем на 60 % ниже, чем максимальные значения, полученные в это же время [4]. Основная причина заключалась в низких концентрациях кремния и нитратов в глубоководной области моря, которые ограничивали рост фитопланктона. Можно заключить, что уровень биогенной обеспеченности в целом не превышал 40 %.

Несмотря на то, что представленные нами результаты расчётов скорости роста фитопланктона для различных сезонов получены в разные годы, они позволяют хотя бы в общих чертах судить о том, как изменяется скорость роста фитопланктона в глубоководной части Чёрного моря и каков уровень биогенной обеспеченности водорослей в различные сезоны.

1. Кондратьева Т. М. Роль отдельных видов и размерных групп водорослей в продукции фитопланктона / Основы биологической продуктивности Чёрного моря. – Киев: Наук. думка, 1979. – С. 99 – 108.
2. Морозова-Водяницкая Н. В. Фитопланктон в Чёрном море и его количественное развитие // Тр. Севастоп. биол. ст. – 1957. – 9. – С. 3 – 13.
3. Стельмах Л. В., Бабич И. И. Сезонная изменчивость отношения органического углерода к хлорофиллу “а” и факторы, ее определяющие в фитопланктоне прибрежных вод Чёрного моря // Морск. экол. журн. – 2006. – 5, № 2. – С. 74 – 87.
4. Стельмах Л. В., Бабич И. И., Тугрул С. и др. Скорость роста фитопланктона и его выедание зоопланктоном в западной части Чёрного моря в осенний период // Океанология. – 2009. – 49, № 1. – С. 90 – 100.
5. Стельмах Л. В., Куфтаркова Е. А., Бабич И. И. Сезонная изменчивость скорости роста фитопланктона в прибрежных водах Чёрного моря (район Севастополя) // Морск. экол. журн. – 2009. – 5, № 2. – С. 74 – 87.
6. Финенко З. З. Скорость роста фитопланктона / Основы биологической продуктивности Чёрного моря. – Киев: Наук. думка, 1979. – С. 97 – 99.
7. Финенко З. З., Крупаткина Д. К. Первичная продукция в Чёрном море в зимне-весенний период // Океанология. – 1993. – 33, № 1. – С. 97 – 104.
8. Data Base NATO-TU BLACK SEA. Download databe at: <http://sfp1.ims.metu.edu.tr/ODBMSDB/>
9. Ivanov L., Kononov S., Melnikov V. et al. Physical, chemical and biological data sets of the TU Black Sea data base: description and evaluation / Ecosystem modeling as a management tool for the Black Sea. – Eds. Ivanov L. I., Oguz T. – Dordrecht: Kluwer Ac. Publish, 1998. – 1. – P. 11 – 37.

Поступила 27 марта 2010 г.

**Питома швидкість росту фітопланктону в глибоководній частині Чорного моря у різні сезони року.** Л. В. Стельмах. На основі первинних результатів, представлених в базі даних відділу екологічної фізіології водоростей ІнБПМ НАН України та міжнародній базі даних NATO-TU BLACK SEA, а також власних результатів виконані розрахунки питомої швидкості росту фітопланктону з добового приросту біомаси фітопланктону для глибоководної частини Чорного моря. Сезонні зміни цього параметра обумовлені комплексною дією факторів середовища і відмінностями в таксономічній структурі фітопланктону.

**Ключові слова:** фітопланктон, питома швидкість росту, Чорне море

**Specific phytoplankton growth rate in deep-water of the Black Sea in different seasons.** L.V. Stelmakh. The calculations of specific growth rate of phytoplankton in deep water of the Black Sea were carried out on the daily increase of phytoplankton biomass. We used the primary results presented in the database of the department of ecological physiology of algae (IBSS, NAS of Ukraine) and the international database of NATO-TU BLACK SEA, as well as own results of. Seasonal changes of this parameter were caused by the complex influence of environmental factors and differences in the taxonomic structure of phytoplankton.

**Key words:** phytoplankton, specific growth rate, the Black Sea