

УДК 551.465

Использование спутниковых данных для наблюдения развития динофлагелляты *Heterocapsa triquetra* в Балтийском море

М.М. Доманов*, В.В. Зернова

*Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН,
Россия 117997, Москва, Нахимовский пр., 36¹*

Received 3.09.2010, received in revised form 10.09.2010, accepted 17.09.2010

*Выполнено исследование динамики развития *Heterocapsa triquetra* в водах южной Балтики. Определен видовой состав, численность и биомасса фитопланктонного сообщества для этого района. На основе непосредственных измерений численности и биомассы *H. triquetra*, а также синхронных спутниковых данных о нормализованной яркости поверхностных вод Балтийского моря в различных спектральных диапазонах предпринята попытка разработать алгоритм для определения *H. triquetra* в условиях доминирования этой водоросли в фитопланктонном сообществе. Сопоставление концентрации пигментов и численности *H. triquetra* подтверждает, что алгоритм может идентифицировать присутствие *H. triquetra* и определять количественно концентрацию хлорофилла в ее клетках. Показано, что алгоритм может быть полезен для оперативного анализа условий вегетации *H. triquetra*.*

Ключевые слова: фитопланктон, Балтийское море, эвтрофикация, хлорофилл «а», спутниковые наблюдения.

Использование информации спутниковых сканеров об оптической яркости поверхностного слоя океана стало одним из важнейших инструментов для получения оперативных и долгосрочных данных о развитии биологических процессов, протекающих в Мировом океане. В настоящее время исследуются возможности более тонкого анализа этой информации для идентификации и наблюдения за развитием конкретных групп фитопланктона. Исследования направлены как на поиск алгоритмов для детектирования массового

развития опасных и потенциально опасных водорослей (Millie et al., 1997; Kahru, Mitchell, 1998; Staehr, Cullen, 2003; Astoreca et al., 2009), так и на изучение развития отдельно выбранных популяций фитопланктона (Cokacar et al., 2004; Aiken et al., 2008; Amin et al., 2009).

В настоящей работе приведены результаты исследования динамики активной вегетации потенциально опасной водоросли *Heterocapsa triquetra* (Her.) Stein. в водах южной Балтики, полученные на основе прямых наблюдений и данных спутниковых сканеров

* Corresponding author E-mail address: domanov@ocean.ru

¹ © Siberian Federal University. All rights reserved

о яркости моря в различных частотных диапазонах.

**Район работ,
материалы и методы**

Материал собран в поверхностном слое (0-10 м) Балтийского моря на станциях в 86-м рейсе НИС «Профессор Штокман» в июне 2007 г. (рис.1). Исследования проводили в период, когда весенняя фаза развития фитопланктона в водах южной Балтики обычно заканчивается, 2-25 июня, в двух районах – прибрежном и мористом. Станции в прибрежном

районе имели небольшую глубину (21-41 м), в мористом районе – 70-93 м. Список и характеристики станций приведены в табл. 1. Для станций характерна двухслойная система с верхним перемешанным слоем до глубины 10 м.

Пробы воды объемом 1 л были профильтрованы через ядерный фильтр (Альфа Трекпор Технолоджи, г. Дубна, Россия) в камере обратной фильтрации. Диаметр пор фильтра составлял 1 мкм. Концентрат объемом 40 мл фиксировали 4 %-м формалином. Подсчет клеток проводили в камере 0.05 см³ на микро-

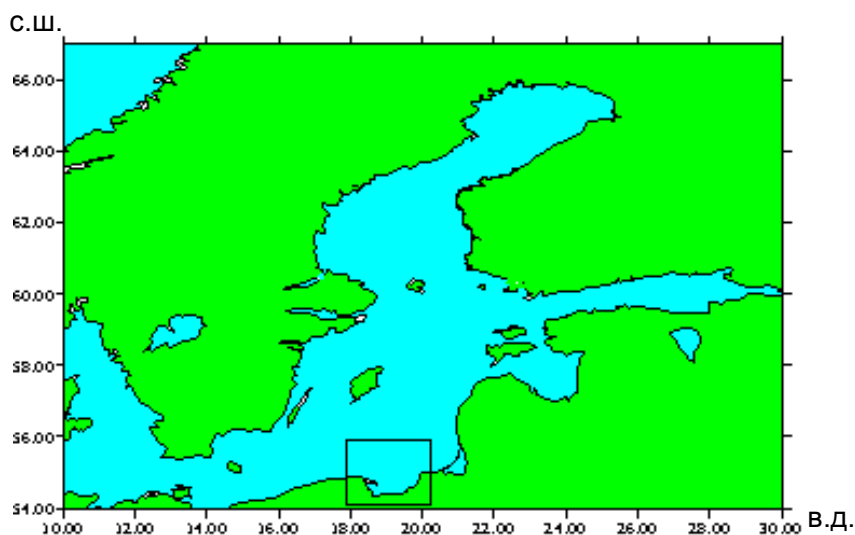


Рис. 1. Схема района проведения работ, изученный район работ выделен прямоугольником

Таблица 1. Характеристики станций отбора проб фитопланктона

№№ станций	Координаты		Глубина, м	Температура, °С	Соленость,‰	Дата
	Широта, северная	Долгота, восточная				
6169	54°52',916	19°46',628	45,0	14,90	7,03	02.06.07
6207	55°27',395	19°32',344	93,0	16,30	7,39	05.06.07
6210	55°01',330	20°06',800	31,1	13,77	7,22	07.06.07
6211	54°53',102	19°51',860	21,6	15,56	7,02	08.06.07
6212	55°02',290	19°42',730	72,5	16,63	7,11	09.06.07
6215	54°55',300	19°52',950	22,1	15,81	7,32	10.06.07
6245	55°15',100	15°39',270	94,0	16,83	7,67	25.06.07
6248	55°21',510	15°42',800	92,9	14,58	7,61	27.06.07

скопе МБИ – 3 при увеличении 7x10. Отмечали размеры живых клеток и пустых створок.

Результаты и обсуждение

Видовой состав фитопланктона был представлен следующими отделами:

Диатомовые (Bacillariophyta): *Cyclotella sp.* (Kutzing), *Thalassiosira baltica* (Grunow, Ostenberg), *Thalassiosira sp.* (Cleve, Hasle).

Перидиниевые (Pyrophyta): *Heterocapsa triquetra* (Ehrenberg, Stain), *Dinophysis acuta* (Ehrenberg), *Dinophysis acuminata* (Claparede and Lachmaun), *Dinophysis norvegica* (Claparede and Lachman), *Dinophysis sp.* (Ehrenberg), *Prorocentrum balticum* (Lohman, Loeblich), *Protoperidinium brevipes* (Paulsen, Balech), *Protoperidinium conicoideis* (Paulsen, Balech), *Gonyaulax sp. 30/24 μ* (Diesing), *Protoperidinium pyriforme* (Paulsen, Balech).

Зеленые (Chlorophyta): *Scenedesmus acuminata* (Lagerh, Chodat), *Scenedesmus quadricauda* (Tarp, Brebison), *Oocystis submarina* (Legerh), *Oocystis pelagica* (Legerh), *Scrippsiella trochoidea* (Stain), *Aphanothece stagnina* (Sprengel, A Braun).

Синезеленые (Cyanophyta): *Merismopedia punctata* (Meyen), *Mycrocystis aeruginosa* (Kutz and Elenk), *Lyngbya limnetica* (Lemmerman).

Количественное распределение фитопланктона. Полученные данные по фитопланктону представляют, по существу, временной тренд изменения состояния фитоценоза в период 2 по 25 июня.

Изменения структуры фитоценоза в прибрежном и мористом районе отражены в табл. 2 и на рис. 2 и 3.

В прибрежном районе 2 июня по численности доминировали цианобактерии (154000 кл/л), но через 5 дней их численность снизилась до 200 кл/л, а численность *H. triquetra* выросла с 24000 до 280000 кл/л. При этом численность зелёных снизилась с 26800 до 800 кл/л. Ещё через сутки численность *H. triquetra* несколько уменьшилась до 208000 кл/л, а цианобактерии вообще отсутствовали. За следующие двое суток численность *H. triquetra* увеличилась в 3 раза (до 644000 кл/л) при численности цианобактерий 6600 кл/л.

В мористом районе трансформация структуры фитоценоза происходила подобным же образом (рис. 3). Основное отличие от района малых глубин заключается в том, что активное развитие *H. triquetra* начиналось с весьма малой численности – 200 кл/л. При этом доминирующими группами были цианобактерии и зелёные, численность

Таблица 2. Численность и биомасса *Heterocapsa triquetra* и суммарная численность и биомасса основных отделов фитопланктона

Станции	Даты	<i>Heterocapsa</i>			Cyanophyta		Chlorophyta	
		Числен., кл/л	Биомасса, мг/м ³	Пустые створки, кл/л	Числен., кл/л	Биомасса, мг/м ³	Числен., кл/л	Биомасса, мг/м ³
Прибрежные станции								
6169	02.06.07	24000	96,0	22000	154000	84,2	26800	95,6
6211	08.06.07	208000	680,0	200	0	0,0	4800	21,2
6215	10.06.07	644000	2576,0	96000	6600	30,0	0	0,0
Мористые станции								
6207	05.06.07	200	0,8	0	3000	0,8	2200	0,2
6210	07.06.07	280000	1120,0	136000	2000	0,1	800	3,7
6212	09.06.07	144000	576,0	83200	9600	11,4	6400	11,5

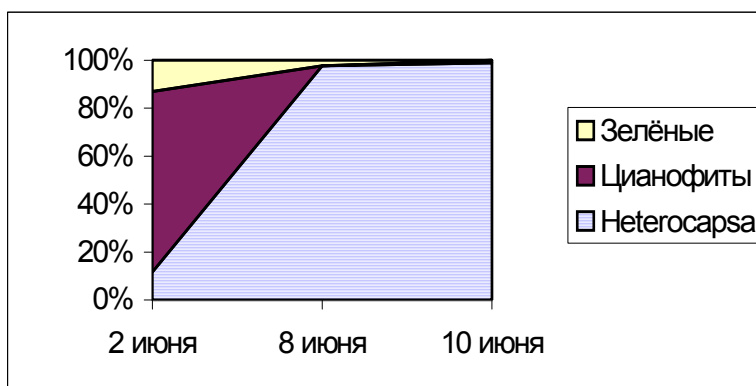


Рис. 2. Изменение соотношения численности *Heterocapsa triquetra* и основных отделов фитопланктона на прибрежных станциях

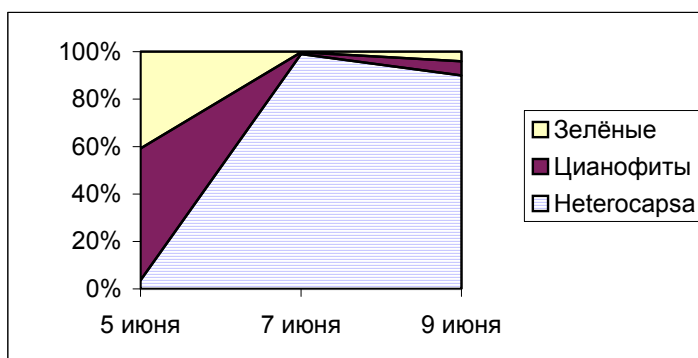


Рис. 3. Изменение соотношения численности *Heterocapsa triquetra* и основных отделов фитопланктона на мористых станциях

Таблица 3. Интенсивность спектральной яркости моря (мВт см⁻² мкм⁻¹) в диапазонах длин волн 443 и 667 нм (MODIS Aqua)

Станции	$I_{(443\text{ нм})}$ мВт см ⁻² мкм ⁻¹	$I_{(667\text{ нм})}$ мВт см ⁻² мкм ⁻¹	$I_{(443\text{ нм})} / I_{(667\text{ нм})}$	Численность <i>H.triquetra</i> , кл/л
6169	0,230	0,1100	2,090909	24000
6207	0,255	0,0825	3,090909	200
6210	0,049	0,0331	1,480363	280000
6211	0,150	0,1050	1,428571	170000
6212	0,276	0,1144	2,412587	144000
6215	0,001	0,0117	0,085470	644000
6245	0,483	0,1127	4,285714	0
6248	0,010	0,0077	1,298701	208000

которых была на порядок выше – 3000 и 2200 кл/л соответственно. Через трое суток *H. triquetra* стала доминирующим видом, её численность выросла до 144000 кл/л, а численность цианофит и зелёных увеличилась в 3 раза. В конце наблюдений через 20 суток численность *H. triquetra* в этом районе составляла 208000 кл/л, а численность цианофит и зелёных – 2000 и 480 кл/л соответственно.

Оценка возможности использования стандартных данных спутниковых сканеров SeaWiFS и MODIS Aqua для идентификации и наблюдения за массовым развитием *H. triquetra* была выполнена методом сопоставления интенсивности спектральной яркости моря (**I**) на различных длинах волн в районе расположения станций и численности *H. triquetra* (табл.3).

При этом было отмечено, что величина отношения интенсивности яркости моря в диапазонах 443 и 667 нм сканера MODIS Aqua ($I_{(443 \text{ нм})} / I_{(667 \text{ нм})}$) коррелирует с величиной численности клеток *H. triquetra* (коэффициент корреляции $r = 0,92, p < 0,05$).

Соотношение между этими величинами может быть аппроксимировано функцией

$$Y = -169299 \cdot \log X + 242002,$$

где Y – число клеток (кл/л), X – соотношение интенсивности спектральных яркостей $I_{(443 \text{ нм})} / I_{(667 \text{ нм})}$.

На основе этого соотношения был составлен алгоритм обработки данных сканера MODIS Aqua для получения снимков пространственного распределения *H. triquetra* в период интенсивного развития водоросли. Серия снимков представлена на рис. 4.

На участках поверхности моря, доступных для спутникового сканирования, можно видеть вариации численности *H. triquetra* с

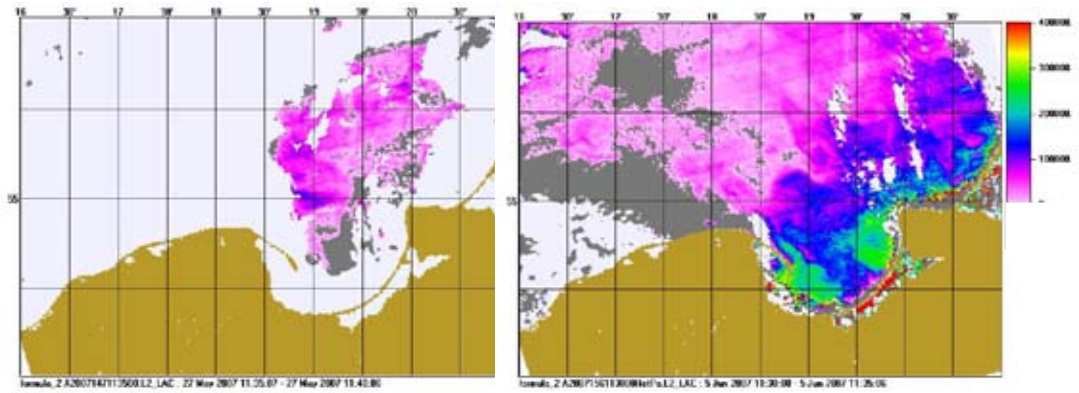
27 мая по 25 июня (рис. 5). При этом можно отметить достаточно быстрое развитие водоросли в локальных районах и смещение максимумов численности в пределах акватории моря.

Графики распределения численности по массиву пикселей в пределах выделенного полигона 5 июня и 12 июня приведены на рис. 6. Гистограмма распределения численности по массиву пикселей в пределах выделенного полигона 5 июня (рис. 6а) имеет двумодальное распределение с двумя максимумами численности 125000 и 215000 кл/л, что, по-видимому, указывает на присутствие двух популяций *H. triquetra* в этом районе. По наблюдениям К. Kononen и соавторов (Kononen et al., 2003), в поверхностных водах развитие цветения *H. triquetra* от единичных клеток до абсолютного доминирования в фитоценозе происходило за 12 дней.

Однако такое цветение у входа в Финский залив могло продолжаться не ослабевая в течение полутора месяцев (июль, август). Вероятно, такое последовательное развитие популяций наблюдается и в данном случае.

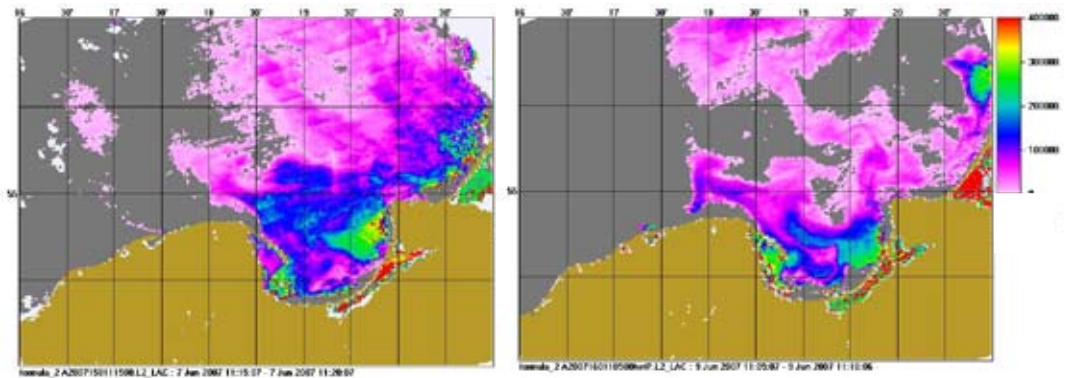
Для детального исследования изменений в планктонном сообществе на полученных снимках был выделен полигон 30' x 30' с координатами 54° 30' с.ш. – 55° с.ш. и 19° в.д. – 19° 30' в.д. На этом полигоне было определено изменение средней численности *H. triquetra* во времени (рис. 5).

При общем снижении средней численности водоросли до 118051 кл/л через 7 дней (12 июня) вид гистограммы распределения численности существенно изменился (рис. 6б). Максимум гистограммы только один и соответствует 60000 кл/л. Присутствие другой сформировавшейся популяции на гистограмме не отражено, а само распределение численности отличается от нормального распределения.



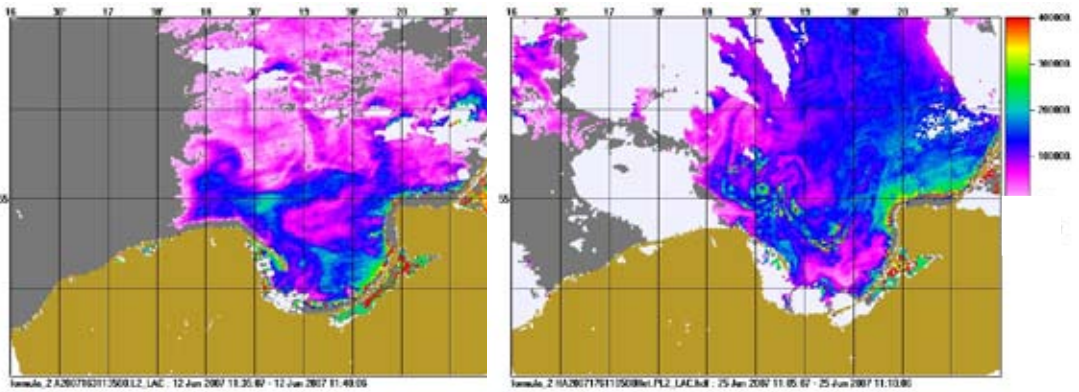
27 мая 2007 г

5 июня 2007 г



7 июня 2007 г


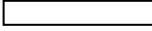

9 июня 2007 г



12 июня 2007 г

25 июня 2007 г

Рис. 4. Ареал популяции *H. triquetra* в южной Балтике, численность (кл/л) показана на цветной шкале:

-  Земля
-  Облачность
-  Фильтр, нет данных о присутствии *Heterocapsa triquetra*.

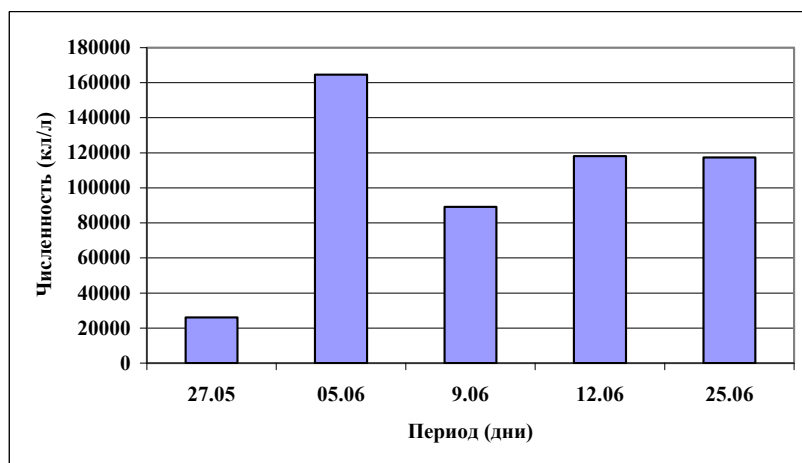


Рис. 5. Изменение средней численности *H. triquetra* (кл/л) на полигоне (54° 30' с.ш. – 55° с.ш. и 19° в.д. – 19° 30' в.д.) с 27.05.07 по 25.06.07

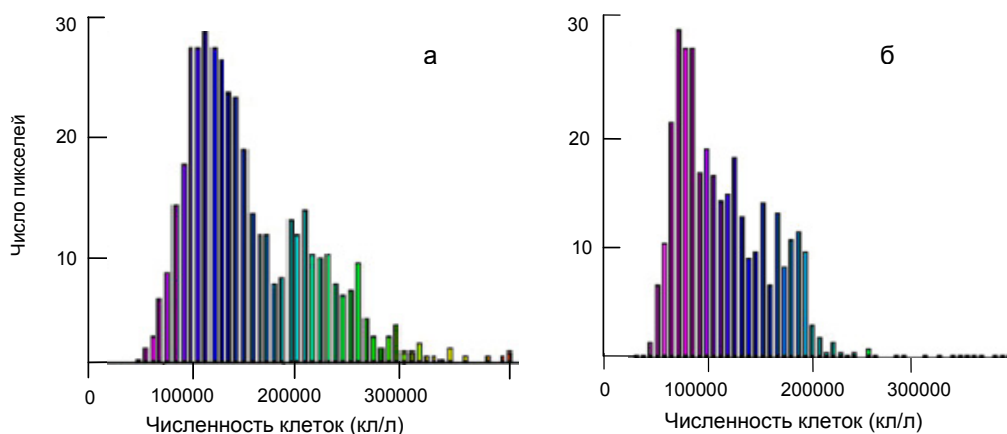


Рис. 6. Гистограмма распределения численности клеток *H. triquetra* (кл/л) в пикселях на полигоне 5 июня (а) и 12 июня (б)

Используя синхронные изменения численности клеток и количества хлорофилла «а», можно установить содержание хлорофилла «а», приходящегося на одну клетку *H. triquetra*. Эквивалентный диаметр клеток *H. triquetra*, который был получен в наших измерениях на основе прямых инструментальных измерений, равен 19 мкм. Такой же размер клеток *H. triquetra* был получен в работе (Koponen et al., 2003). Таким образом, мы можем сравнить наши расчеты содержания хлорофилла «а» на клетку, сделанные на основе спутниковых данных, с результатами

определений, выполненных в работе (Koponen et al., 2003).

В расчетах использованы значения концентрации хлорофилла «а», полученного в качестве стандартного продукта со спутника MODIS Aqua. При этом была введена корректирующая региональная поправка, определенная для этого района по данным прямых инструментальных измерений (Доманов и др., 2002). Для станции 6210, где *H. triquetra* доминировала с численностью 280000 кл/л, содержание хлорофилла «а» на клетку составляло $6,3 \times 10^{-12}$ г, а на станции 6215, где ее

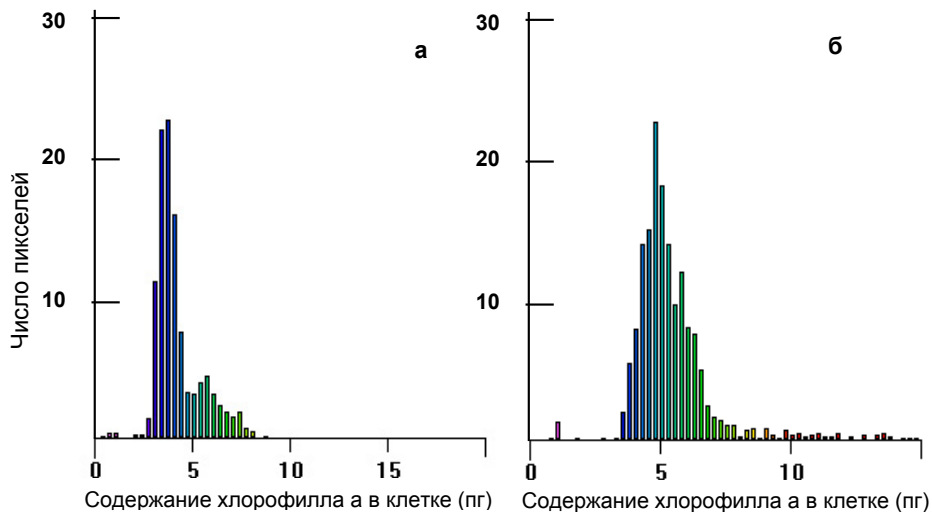


Рис. 7. Гистограммы распределения содержания хлорофилла «а» на клетку *H. triquetra* (10^{-12} г) в пикселях на полигоне 5 июня (а) и 12 июня (б)

численность достигала 640000 кл/л, $5,2 \times 10^{-12}$ г. В работе (Kononen et al., 2003) эта величина варьировала от 1,5 до 7,2 пг хлорофилла «а» на клетку, а в 40 % случаев – от 3 до 4,5 пг хлорофилла «а» на клетку.

Для данных, полученных 5 и 12 июня, построены гистограммы распределения содержания хлорофилла «а» в клетке в пикселях для ранее выделенного полигона (рис. 7).

Гистограммы содержания хлорофилла «а» в клетке, как и ранее приведенные на рис. 6 гистограммы численности, отражают изменение состояния планктонного сообщества. Гистограмма 5 июня (рис. 7а) двумодальна и показывает, что максимумы пикселей соответствуют содержаниям 4 пг и 6 пг хлорофилла «а» на клетку. Можно предполагать, что максимум, соответствующий 4 пг, характеризует молодую развивающуюся популяцию, а в более старой популяции, которой соответствует существенно большая численность, количество хлорофилла «а» на клетку больше и составляет 6 пг. На рис. 7б максимальное количество пикселей соответствует содержанию хлорофилла «а» на клетку 5 пг. Имеется

лишь один максимум, что характерно для популяции без статистически выраженных особенностей общей численности. Содержание хлорофилла «а» в клетке варьирует в пределах 3 – 7 пг, что согласуется с интервалом значений, приведенным в работе (Kononen et al., 2003).

Заключение

На основе предложенного алгоритма обработки спутниковых данных получены параметры, характеризующие развитие популяции *H. triquetra* в условиях доминирования этой водоросли в фитопланктонном сообществе. Оценены пространственные масштабы и динамика локального развития популяции *H. triquetra*.

В исследованном временном интервале зафиксированы структурные изменения в сообществе, как в распределении численности, так и в содержании хлорофилла «а» в клетках *H. triquetra*. Приведенные данные показывают возможность масштабного оперативного исследования активной вегетации потенциально опасной водоросли *H. triquetra* в водах южной Балтики.

Благодарим NASA Goddard DAAC за предоставление спутниковых данных MODIS Aqua.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы Президиума РАН П-24 «Происхождение биосферы и эволюция геобиологических систем».

Список литературы

Доманов М.М., Шеберстов С.В., Демидов А.Б., Зернова В.В. (2002) Экосистемные исследования Балтики на основе данных спутника SeaWiFS (анализ и перспективы). Экологические системы и приборы. 10: 26-31.

Aiken J., Hardman-Mountford N.J., Barlow R., Fishwick J., Hirata T., Smyth T. (2008) Functional links between bioenergetics and bio-optical traits of phytoplankton taxonomic groups: an overarching hypothesis with applications for ocean colour remote sensing. J. Plank. Res. 30(2):165-181.

Amin R., Zhou J., Gilerson A., Gross B., Moshary F., Ahmed S. (2009) Novel optical techniques for detecting and classifying toxic dinoflagellate *Karenia brevis* blooms using satellite imagery. Optics Express 17: 9126 – 9144.

Astoreca R., Rousseau V., Ruddick K., Knechciak C., Van Mol B., Jean-Yves Parent J.Y., Lancelot C. (2009) Development and application of an algorithm for detecting *Phaeocystis globosa* blooms in the Case 2 Southern North Sea waters. J. Plankton Res. 31(3): 287–300.

Cokacar T., Oguz T., Kubilay N. (2004) Satellite-detected early summer coccolithophore blooms and their interannual variability in the Black Sea. Deep-Sea Res. I: 51: 1017-1031.

Kahru M., Mitchell B.G. (1998). Spectral reflectance and absorption of a massive red tide off Southern California. J. Geophys. Res. 103: 601–621.

Kononen K., Huttunen M., Hallfors S. (2003). Development of deep chlorophyll maximum of *Heterocapsa triquerta* Ehrenb. at the entrance to the Gulf of Finland. Limnol. Oceanogr. 48 (2): 594-607.

Millie D.F., Schofield O. M., Kirkpatrick G.J. et al. (1997) Detection of harmful algal blooms using photopigments and absorption signatures: a case study of the Florida red tide dinoflagellate *Gymnodinium breve*. Limnol. Oceanogr. 42: 1240–1251.

Staeher P.A., Cullen J.J. (2003) Detection of *Karenia mikimotoi* by spectral absorption signatures. J. Plankton Res. 25: 1237–1249.

Using of Satellite Data for Observation of Vegetation Dinoflagellate *Heterocapsa Triquetra* in the Baltic Sea

Michail M. Domanov and Victoria V. Zernova
*P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS,
36 Nakhimovsky Prospect, Moscow, 117997 Russia*

*Dynamic of the vegetation of harmful algal *Heterocapsa triquetra* in the Southern Baltic water was studied. The composition, abundance, and biomass of phytoplankton community were under investigation. On the base of the direct determinations of the abundance *H. triquetra* and satellite normalized brightness of surface water of Baltic Sea in different spectral ranges the attempt to development the algorithm for detecting *H. triquetra* in *H. triquetra* – dominated natural communities have been made. Comparison with pigment concentrations and cell counts suggests that the algorithm can flag the presence of *H. triquetra* and provide quantitative information about chlorophyll concentrations in cells. It is shown that the algorithm can be useful for operative analysis of condition vegetation of *H. triquetra*.*

Keywords: Phytoplankton, Baltic Sea, eutrophication, chlorophyll «a», satellite observations.
