

Анализ воздействия тропических циклонов на поля концентрации хлорофилла-«а» в Северо-Западной части Тихого океана в 1979-1986 и 1996-2010 гг. с использованием данных пассивного спутникового зондирования цвета океана

П.А. Салюк¹, И.Е. Стёпочкин², А.И. Алексанин³, И.А. Голик¹

¹ *Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН
Владивосток, Россия*

E-mail: pavel.salyuk@gmail.com

² *Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, Владивосток, Россия*

E-mail: fizzeg@gmail.com

³ *Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия*

E-mail: aleks@iacp.dvo.ru

Для исследований использованы спутниковые данные по цвету морской поверхности сканеров CZCS, OCTS, SeaWiFS, MODIS-Aqua и данные Японского метеорологического агентства, содержащие траектории тропических циклонов (ТЦ), скорости ветра и радиусы воздействия на верхний слой океана. Всего данные позволили проанализировать воздействие 123 ТЦ на изменение концентрации хлорофилла – «а» на 1389 акваториях в период 1979-1986 и 1996-2010 гг. и воздействие 135 ТЦ на изменение температуры поверхности моря в 1412 акваториях в период 2002-2010 гг. Показано, что повышение концентрации хлорофилла - «а» зафиксировано в 81% случаев, понижение температуры в 76%. Наиболее вероятное изменение концентрации хлорофилла - «а» составило +18%, температуры -3%. Рост клеток фитопланктона начинается на 2-4 день после прохождения тропического циклона и продолжается около двух недель. В работе проанализирована специфика использования спутниковых данных при анализе изменения концентрации хлорофилла - «а».

Ключевые слова: хлорофилл-«а», фитопланктон, тропический циклон, тайфун, ураган, цвет океана, спутник, Тихий океан, дистанционное зондирование.

Введение

Исследования воздействия ТЦ на верхние слои океана активно проводились на протяжении последних нескольких десятков лет. Основное внимание при этом уделялось воздействию на гидрологические параметры морской воды и на моделирование физических процессов воздействия тропического циклона на верхний слой океана, определение масштабов воздействия. Показано, что возмущения полей гидрологических параметров, вызванные тропическим циклоном, могут оставаться на протяжении нескольких недель или даже месяцев, суммарная площадь акватории, подвергающаяся воздействию, составляет несколько сотен квадратных километров, а величина изменения температуры морской поверхности составляет несколько градусов (Price, 1981; Григоркина, Фукс, 1986; Stramma, Cornillon, 1986). Исследований изменения параметров, характеризующих фитопланктонные сообщества, проведено намного меньше, что связано с более сложными методами измерений и более поздним развитием этих методов. Различными авторами проведены работы по исследованию влияния отдельных тропических циклонов на содержание фитопланктона в морской воде. В работах показано, что обычно прохождение тропического циклона приводит к значимому повышению концентрации хлорофилла-«а», основ-

ного пигмента фитопланктона, на величину 20-30%, которое сохраняется от нескольких недель до месяца. Основной механизм, за счет которого происходит увеличение концентрации фитопланктона, состоит в подъеме питательных веществ на поверхность. Подобные исследования обычно проводятся с помощью спутниковых данных, данных автоматических буйковых станций и данных экспедиций (Lin et al., 2003; Babin et al., 2004; Пермяков и др., 2005; Chen, Tang, 2012).

Исследований, направленных на глобальную оценку воздействия ТЦ на фитопланктонные сообщества и производимую ими первичную продукцию, практически не проводилось. Тем более не рассмотрена вся широта возможных подходов и методов решения этой проблемы для валидации различных оценок. Среди таких работ можно выделить (Babin et al., 2004), где проанализировано воздействие 13 ураганов в Саргассовом море с 1998 по 2001 гг. и показано, что увеличение концентрации хлорофилла-«а» имеет положительную корреляцию со скоростью ветра и отрицательную корреляцию с величиной уменьшения температуры поверхностного слоя. В работе (Hanshaw et al., 2008) исследовано общее воздействие ураганов на цвет океана в период 1997-2005 гг., и показано, что они приводят к значимому увеличению концентрации хлорофилла-«а» в верхнем слое океана, которое зависит от интенсивности урагана, однако общее воздействие на Северо-Атлантический регион незначимо, поскольку количество клеток фитопланктона, подверженных воздействию ураганов, составляет примерно 2,8% от общего их числа в регионе. Существуют работы по оценке значимости тропических циклонов в глобальном газообмене CO₂ между атмосферой и океаном. По последним исследованиям (Levy et al., 2012) во всем Мировом океане от 40° ю.ш. до 40° с.ш. ТЦ определяют ~2% потока CO₂ через границу океан-атмосфера, в отдельных регионах эта цифра может варьироваться в пределах 0-10%. Данные оценки ниже, чем более ранние, полученные в работах (Bates, 2007; Huang, Imberger, 2010). Необходимо иметь в виду, что полученные результаты актуальны для текущего состояния климатической системы и не отражают возможную тенденцию увеличения количества ТЦ при увеличении глобальной температуры (Emanuel, 2005; Webster et al., 2005).

Цель представленного исследования – оценить типичные воздействия тропических циклонов Северо-западной части Тихого океана на концентрацию хлорофилла-«а» в верхнем слое океана. Важность и актуальность темы определяется необходимостью изучения процессов формирования биопродуктивности океана, а также процессов отрицательных обратных связей климатических изменений, которые могут иметь различный вклад в зависимости от текущего состояния климатической системы. Решение поставленной задачи позволит перейти к оценке изменения первичной продукции в регионе вследствие воздей-

ствия тропических циклонов, поскольку концентрация хлорофилла-«а» является одним из главных факторов ее определения.

Помимо изменений концентрации хлорофилла-«а» в работе также анализируется изменение температуры поверхности моря (ТПМ), поскольку это один из основных параметров морской воды, который является хорошим индикатором воздействия ТЦ на верхний слой океана и может быть использован для оценки изменения содержания питательных веществ (Behrenfeld, Falkowski, 1997). Полученные результаты используются в работе как показатель корректности применяемых процедур.

Исходные данные

В качестве данных для анализа использовались спутниковые данные сканеров пассивного дистанционного зондирования восходящего излучения морской поверхности в оптическом диапазоне. Это открытые данные по концентрации хлорофилла-«а» и ТПМ (источник: <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>, 3-й уровень данных) с регулярной сеткой 9 км. Период проанализированных данных для концентрации хлорофилла-«а» включает 1979-1986 и 1996-2010 гг., сканеры CZCS, OCTS, SeaWiFS, MODIS-Aqua. Период для ТПМ: 2002-2011 гг., сканер MODIS-Aqua.

Для анализа пространственно-временного распределения ТЦ использовались данные Японского метеорологического агентства, содержащие траектории ТЦ, скорости ветра и радиусы воздействия на верхний слой океана. Период доступных данных с 1951 г. по 2010 г. (Yamaguchi, Komori, 2009).

Методы исследования

Для анализа использованы следующие подходы:

1. **Выбор районов для анализа.** Рассматривались районы вдоль траектории движения ТЦ, где скорость ветра превышала 15 м/с. Каждый район выбирался таким образом, чтобы не пересекаться с траекториями других тропических циклонов за 30 дней до и 10 дней после рассматриваемого, чтобы исследовать воздействие только одного тропического циклона.

2. **Используемые данные.** В каждом районе происходило накопление спутниковых данных по температуре и цвету морской поверхности за весь доступный период. Районы, где не было корректных измерений в период 30 дней до и 30 дней после ТЦ, из дальней-

шего анализа исключались. В каждом районе рассчитывался сезонный ход по всему периоду доступных спутниковых данных.

3. *Анализ относительного изменения концентрации хлорофилла-«а» и ТПМ (ΔC и ΔT) до и после прохождения ТЦ.* В каждом районе рассчитывалось среднее значение разницы между полем значений, накопленных за период 2-10 дней до ТЦ, и полем за период 2-10 дней после ТЦ с учетом сезонных изменений. В случае если итоговый набор данных составлял менее 33 пикселей (2673 км^2), то такой район из дальнейшего анализа исключался.

4. *Анализ временного хода среднего относительного изменения концентрации хлорофилла-«а» и температуры ($\Delta \tilde{C}$ и $\Delta \tilde{T}$) в период прохождения ТЦ.* В качестве опорных значений выбран период данных 4-10 дней до тропического циклона. Далее рассчитывалось среднее значение аномалии между полем опорных значений и полем концентрации хлорофилла-«а» и температуры в период от -10 до +20 дней относительно тропического циклона с окном ± 1 день и шагом 1 день.

Всего было выделено 1389 районов для корректного анализа изменения концентрации хлорофилла-«а» и 1412 районов для корректного анализа изменения ТПМ. Траектории ТЦ, удовлетворяющих приведенным условиям, представлены на *рис. 1*.

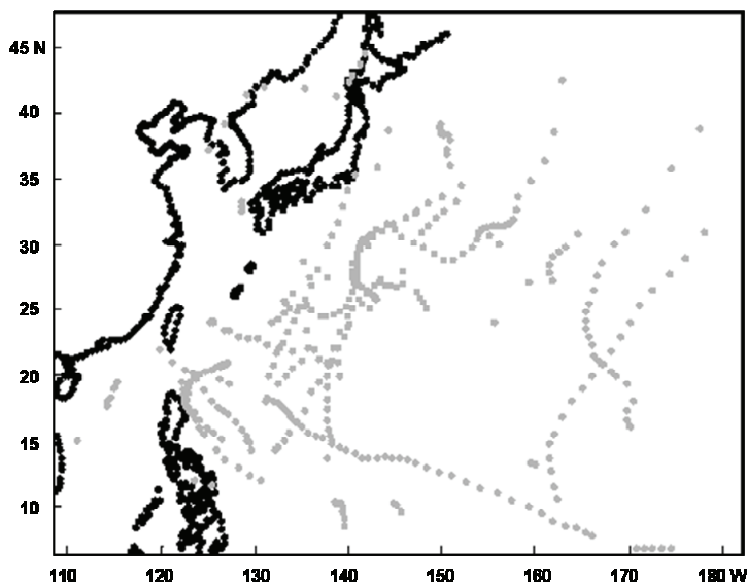


Рис. 1. Траектории тропических циклонов, отобранных для анализа

Результаты

На *рис. 2* показан пример воздействия тайфуна «Ioke» на верхний слой океана. *Рис. 2а* – относительное изменение концентрации хлорофилла-«а», *рис. 2б* – относительное изменение температуры морской поверхности. Виден четкий след от движения тропи-

ческого циклона, проявляющийся как на поле гидрологических параметров морской воды, так и на поле биооптических параметров.

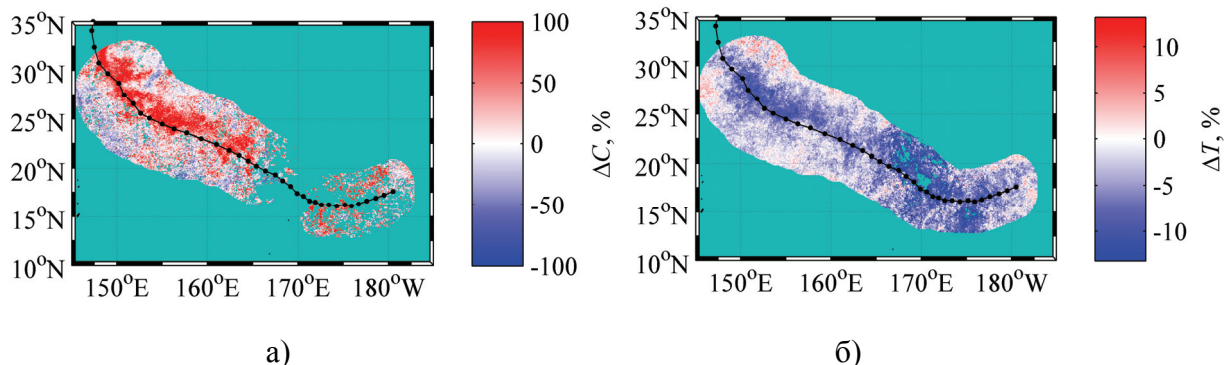


Рис. 2. Пример воздействия тайфуна «Ioke» на верхний слой океана в период 31.08.2006 - 04.09.2006. (а) относительное изменение концентрации хлорофилла-«а»; (б) относительное изменение температуры морской поверхности

На рис. 3 представлены результаты анализа относительного изменения концентрации хлорофилла-«а» и ТПМ. Видно значимое повышение концентрации хлорофилла-«а» (зафиксировано в 81% случаев) и значимое понижение температуры (76% случаев). Наиболее вероятное изменение концентрации составило +18%, температуры -3%.

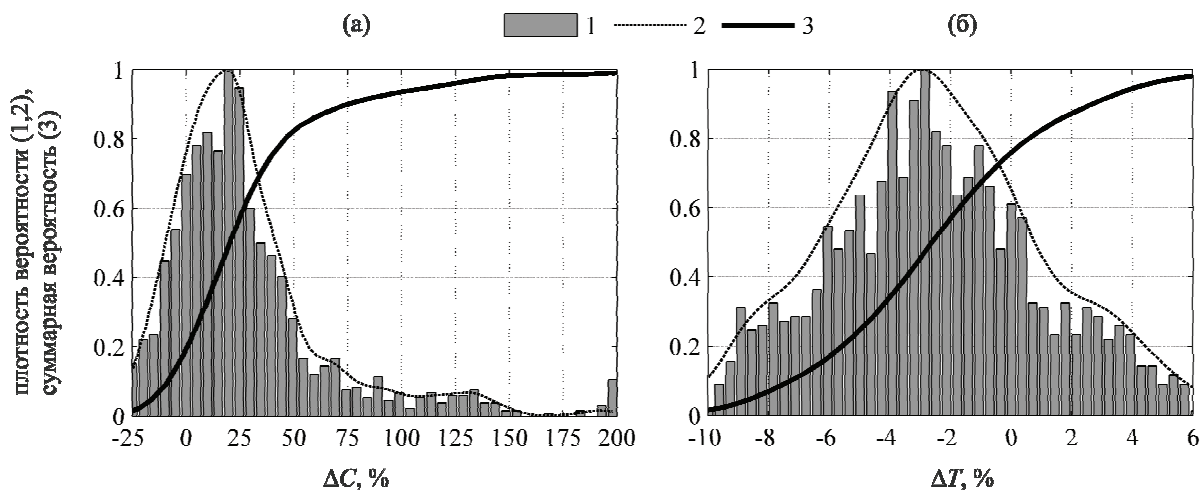


Рис. 3. Анализ относительных изменений анализируемых параметров в Северо-западной части Тихого океана, 1 – гистограмма, 2 – функция распределения плотности вероятности, 3 – функция распределения суммарной вероятности. (а) концентрация хлорофилла-«а»; (б) температура морской поверхности

На рис. 4 представлено изменение концентрации хлорофилла-«а» (линия 1) и ТПМ (линия 2). Рост клеток фитопланктона начинается на 2-4 день после прохождения ТЦ и продолжается около двух недель. Важно отметить, что реакция температуры на прохождение ТЦ наблюдается раньше, сразу во время его прохождения, кроме этого температура

возвращается к своим первоначальным значениям также раньше, примерно на 2-3 дня, по сравнению с концентрацией хлорофилла-«а».

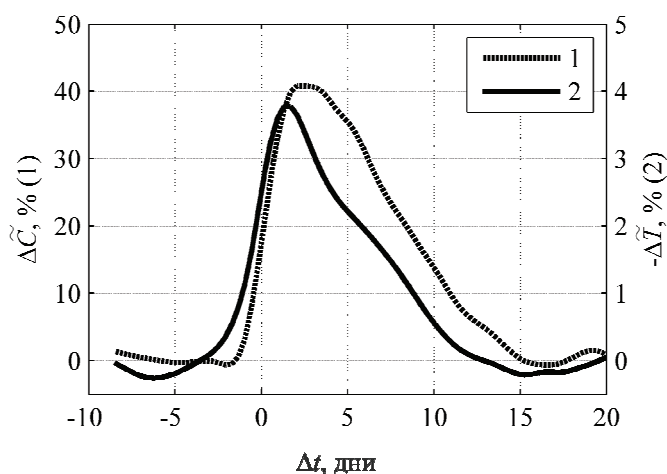


Рис. 4. Среднее по региону относительное изменение концентрации хлорофилла-«а», кривая 1, и температуры, кривая 2, в зависимости от времени Δt относительно прохождения тропического циклона в Северо-западной части Тихого океана

Обсуждение результатов

В работе представлен анализ, основывающийся на большом количестве использованных данных, что нивелирует недостатки представленных подходов, связанные с отсутствием анализа горизонтального смещения водных масс. Именно последним можно объяснить наличие случаев, когда средняя температура верхнего слоя океана при прохождении ТЦ увеличивалась. Как в случае изменения концентрации хлорофилла-«а», так и в случае изменения температуры верхнего слоя океана распределения плотностей вероятностей (рис. 3) имеют ассиметричную форму и сдвиг математического ожидания в сторону положительных и отрицательных значений, соответственно. Это говорит о значимости воздействия ТЦ на рассматриваемые параметры. В случае, если бы воздействие тропических циклонов было не значимо, либо выбранные подходы были неверны, то наблюдались бы симметричные распределения относительно нуля по оси абсцисс.

При анализе изменений концентрации хлорофилла-«а» необходимо иметь в виду следующее. Видимое со спутника увеличение концентрации может быть обусловлено как ростом количества клеток фитопланктона за счет поступления биогенных веществ в верхние слои океана, так и просто поднятием фитопланктона к поверхности, где клетки будут более значимо влиять на оптический сигнал, регистрируемый со спутника. Однако, по характеру изменения концентрации и температуры (рис. 4), можно сделать вывод, что пер-

вый биологический процесс имеет место и значим, поскольку увеличение концентрации начинается позже, чем происходит уменьшение температуры, и повышенные значения остаются более длительный срок.

Заключение

Получены оценки изменения концентрации хлорофилла-«а» в результате воздействия тропических циклонов на верхний слой океана в Северо-Западной части Тихого океана. Повышение концентрации зафиксировано в 81% случаев, понижение температуры в 76%. Наиболее вероятное изменение концентрации составило +18%, температуры -3%. Развитие роста клеток фитопланктона начинается на 2-4 день после прохождения тропического циклона и продолжается около 2-х недель.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 12-05-31166мол_а.

Литература

1. Григоркина П.Г., Фукс В.Р. Воздействие тайфунов на океан. Л.: Гидрометеиздат, 1986, 243 с.
2. Пермяков М.С., Акмайкин Д.А., Салюк П.А., Букин О.А., Тархова Т.И., Смолин П.В. Влияние тайфунов на поля концентрации хлорофилла -«а» по данным сканера цвета морской воды SeaWiFS. // Исследование Земли из космоса. 2005. № 6. С. 56-62.
3. Babin S.M., Carton J.A., Dickey T.D., Wiggert J.D. Satellite evidence of hurricane-induced phytoplankton blooms in an oceanic desert. // J. Geophys. Res. 2004. Vol. 109. P. C03043. doi:10.1029/2003JC001938.
4. Bates N.R. Interannual variability of the oceanic CO₂ sink in the subtropical gyre of the North Atlantic Ocean over the last 2 decades. // J. Geophys. Res.. 2007. Vol. 112. P. C09013. doi:10.1029/2006JC003759.
5. Behrenfeld M.J., Falkowski P.G. A consumer's guide to phytoplankton primary productivity models. - Limnology and Oceanography. 1997. Vol. 42. P. 1479-1491.
6. Chen-Tung Arthur Chen, Cho-Teng Liu, W.S. Chuang, Y.J. Yang, Fuh-KwoShiah, T.Y. Tang, S.W. Chung. Enhanced buoyancy and hence upwelling of subsurface Kuroshio waters after a typhoon in the southern East China Sea. // Journal of Marine Systems. 2003. Vol. 42. No. 1-2. P. 65-79.
7. Chen Y., Tang D. Eddy-feature phytoplankton bloom induced by a tropical cyclone in the South China Sea. // International Journal of Remote Sensing. 2012. Vol. 33. No. 23. P. 7444-7457.
8. Emanuel K.A. Increasing destructiveness of tropical cyclone over the past 30 years. // Nature. 2005. Vol. 436. P.686-688.
9. Feldman G. C., McClain C. R. Ocean Color Web, Reprocessing 2011, NASA Goddard Space Flight Center. Eds. Kuring, N., Bailey, S. W. 2011. <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>.
10. Fuh-KwoShiah, Shi-Wei Chung, Shuh-Ji Kao, Gwo-Ching Gong, Kon-Kee Liu. Biological and hydrographical responses to tropical cyclones (typhoons) in the continental shelf of the Taiwan Strait. // Continental Shelf Research. 2000. Vol. 20. No. 15. P.2029-2044.
11. Hanshaw M.N., Lozier M.S., Palter J.B. Integrated impact of tropical cyclones on sea surface chlorophyll in the North Atlantic. // Geophysical Research Letters. 2008. Vol. 35. No. 1. P. L01601. doi:10.1029/2007GL031862.
12. Huang P. and Imberger J. Variation of pCO₂ in ocean surface water in response to the passage of a hurricane. // J. Geophys. Res.. 2010. Vol. 115. Issue. C10. doi:10.1029/2010JC006185.
13. Levy M., Lemaigne M., Bopp L., Vincent E.M., Madec G., Ethe C., Kumar D., Sarma V.V.S.S. Contribution of tropical cyclones to the air-sea CO₂ flux: a global view. // Global Biogeochem. Cycles. 2012. Vol. 26. No. 2. doi:10.1029/2011GB004145.
14. Lin I., Liu W.T., Wu C.C. et al. New evidence for enhanced ocean primary production triggered by tropical cyclone. // Geophys. Res. Let.. 2003. Vol. 30. No. 13. P. 1718. doi:10.1029/2003GL017141.

15. McClain C.R., Feldman G.C. and S.B. Hooker. An overview of the SeaWiFS project and strategies for producing a climate research quality global ocean bio-optical time series.- *Deep Sea Res. II.* 2004. Vol. 51. P. 5-42.
16. Price J.F. Upper Ocean Response to Hurricane. // *Journal of Physical Oceanography.* 1981. Vol.11. No.2. P. 153-175.
17. Shiah F.K., Chung S.Y., Kao S.J., Gong G.C., Liu K.K. Biological and hydrographical responses to tropical cyclones(Typhoons) in the continental shelf of the Taiwan Strait. // *Cont. Shelf Res.* 2000. Vol. 20. P. 2029-2044.
18. Stramma L., Cornillon P. Satellite observations of the sea surface cooling by hurricane. // *J. Geophys. Res.* 1986. Vol. 91. No. C4. P. 5031-5035.
19. Webster P.J., Holland G.J., Curry J.A., Chang H.R. Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment. // *Science.* 2005. Vol. 309. No. 5742. P.1844-1846.
20. Yamaguchi M. and T. Komori. Outline of the Typhoon Ensemble Prediction System at the Japan Meteorological Agency. RSMC Tokyo-Typhoon Center Technical Review. 2009. No. 11. P. 14-24.

Analysis of tropical cyclones influence on the chlorophyll-a concentration fields in North-Western Pacific during 1979-1986 and 1996-2010 using satellite passive remote ocean color data.

P.A. Salyuk ¹, I.E. Steepochkin ², A.I. Aleksanin ³, I.A. Golik ¹

¹ V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia
E-mail: pavel.salyuk@gmail.com

² Adm. G.I. Nevelski Maritime State University, Vladivostok, Russia
E-mail: fizzeg@gmail.com

³ Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok, Russia
E-mail: aleks@iacp.dvo.ru

The satellite ocean color data of CZCS, OCTS, SeaWiFS, MODIS-Aqua and data of the Japan Meteorological Agency on tropical cyclones (TC) trajectories, wind speeds and area of TC influence were used in the study. In total, the data allowed to analyze the influence of 123 TCs on chlorophyll-a concentration in 1389 areas during 1979-1986 and 1996-2010, and influence of 135 TCs on sea surface temperature (SST) in 1412 areas during 2002-2010. It was shown that chlorophyll-a concentration increased in 81% cases, SST decreased in 76% cases. The most probable change of chlorophyll-a concentration was +18%; that of SST -3%. The growth of phytoplankton cells was observed on the 2nd-4th days after TC passage and continued for about 2 weeks. Peculiarities of satellite data use in chlorophyll-a concentration change analysis are discussed.

Keywords: chlorophyll-a, phytoplankton, tropical cyclones, typhoon, hurricane, ocean color, satellite, Pacific Ocean, remote sensing.

References

1. Grigorkina R.G., Fuks V.R. *Vozdeistvie taifunov na okean* (Influence of typhoons to ocean), Leningrad: "Gidrometeoizdat", 1986, 243 p.
2. Permyakov M.S., Akmaikin D.A., Salyuk P.A., Bukin O.A., Tarhova T.I., Smolin P.V. Vliyanie taifunov na polya koncentracii hlorofilla – "a" po dannym skanera tsveta morskoi vodyi SeaWiFS (Typhoon influence on chlorophyll – "a" concentration fields based on remote sensing data of SeaWiFS), *Issledovanie Zemli is Kosmosa*, 2005, No. 6, pp. 56-62.
3. Babin S.M., Carton J.A., Dickey T.D., Wiggert J.D. Satellite evidence of hurricane-induced phytoplankton blooms in an oceanic desert, *J. Geophys. Res.*, 2004, Vol. 109, p. C03043. doi:10.1029/2003JC001938.
4. Bates N. R. Interannual variability of the oceanic CO₂ sink in the subtropical gyre of the North Atlantic Ocean over the last 2 decades, *J. Geophys. Res.*, 2007, Vol. 112, p. C09013, doi:10.1029/2006JC003759.
5. Behrenfeld M.J., Falkowski P.G. A consumer's guide to phytoplankton primary productivity models, *Limnology and Oceanography*, 1997, Vol. 42, pp. 1479-1491.

6. Chen Ch.-T.A., Liu Ch.-T., W.S. Chuang, Y.J. Yang, Fuh-KwoShiah, T.Y. Tang, S.W. Chung. Enhanced buoyancy and hence upwelling of subsurface Kuroshio waters after a typhoon in the southern East China Sea, *Journal of Marine Systems*, 2003, Vol. 42, No. 1-2, pp. 65– 79.
7. Chen Y., Tang D. Eddy-feature phytoplankton bloom induced by a tropical cyclone in the South China Sea, *International Journal of Remote Sensing*, 2012, Vol. 33, No. 23. pp. 7444-7457.
8. Emanuel K.A. Increasing destructiveness of tropical cyclone over the past 30 years, *Nature*, 2005, Vol. 436, pp. 686-688.
9. Feldman G. C., McClain C. R. *Ocean Color Web, Reprocessing 2011, NASA Goddard Space Flight Center. Eds. Kuring, N., Bailey, S. W., 2011.* <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>
10. Fuh-KwoShiah, Shi-Wei Chung, Shuh-Ji Kao, Gwo-Ching Gong, Kon-Kee Liu. Biological and hydrographical responses to tropical cyclones (typhoons) in the continental shelf of the Taiwan Strait, *Continental Shelf Research*, 2000, Vol. 20, No. 15, pp. 2029-2044.
11. Hanshaw M.N., Lozier M.S., Palter J.B. Integrated impact of tropical cyclones on sea surface chlorophyll in the North Atlantic, *Geophysical Research Letters*, 2008, Vol. 35, No. 1, p. L01601, doi:10.1029/2007GL031862.
12. Huang P. and Imberger J. Variation of pCO₂ in ocean surface water in response to the passage of a hurricane, *J. Geophys. Res.*, 2010, Vol. 115, Issue C10, doi:10.1029/2010JC006185.
13. Levy M., Lengaigne M., Bopp L., Vincent E.M., Madec G., Ethe C., Kumar D., Sarma V.V.S.S. Contribution of tropical cyclones to the air-sea CO₂ flux: a global view, *Global Biogeochem. Cycles*, 2012, Vol. 26, No. 2, doi:10.1029/2011GB004145.
14. Lin I., Liu W.T., Wu C.C. New evidence for enhanced ocean primary production triggered by tropical cyclone, *Geophys. Res. Let.*, 2003, Vol. 30, No. 13, pp. 1718. doi:10.1029/2003GL017141.
15. McClain C.R., Feldman G.C. and S.B. Hooker. An overview of the SeaWiFS project and strategies for producing a climate research quality global ocean bio-optical time series, *Deep Sea Res. II*, 2004, Vol. 51, pp. 5-42.
16. Price J.F. Upper Ocean Response to Hurricane, *Journal of Physical Oceanography*, 1981, Vol. 11, No.2 , pp. 153-175.
17. Shiah F.K., Chung S.Y., Kao S.J., Gong G.C., Liu K.K. Biological and hydrographical responses to tropical cyclones(Typhoons) in the continental shelf of the Taiwan Strait, *Cont. Shelf Res.*, 2000, Vol. 20, pp. 2029-2044.
18. Stramma L., Cornillon P. Satellite observations of the sea surface cooling by hurricane, *J. Geophys. Res.*, 1986, Vol. 91, No. C4, pp. 5031-5035.
19. Webster P.J., Holland G.J., Curry J.A., Chang H.R. Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment, *Science*, 2005, Vol. 309, No. 5742, pp. 1844-1846.
20. Yamaguchi M. and T. Komori. Outline of the Typhoon Ensemble Prediction System at the Japan Meteorological Agency, *RSMC Tokyo-Typhoon Center Technical Review*, 2009, No. 11, pp.14-24.