

Обзор продуктов Службы мониторинга морской среды *Copernicus*, доступных для Арктического региона

© 2017 А.Л. Холод

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

E-mail: antonholod@mail.ru

Поступила в редакцию 01.12.2016 г.

Дается обзор продуктов, доступных через оперативную систему Службы мониторинга морской среды *Copernicus*. Рассмотрены продукты модельных расчетов, спутниковых и *in situ* измерений для Арктического региона. Приведены пространственные и временные характеристики, показаны результаты визуализации продуктов системы встроенным инструментарием.

Ключевые слова: Арктика, модель, спутниковые измерения, *in situ* измерения, продукты, Служба мониторинга морской среды *Copernicus*, визуализация.

DOI: 10.22449/0233-7584-2017-2-28-38

Введение. Служба мониторинга морской среды *Copernicus* (далее – Морская служба *Copernicus*) начала свою работу с апреля 2015 г. [1]. Она основана на получении данных спутниковых наблюдений о состоянии океана и их последующей ассимиляции в различные математические модели состояния морской среды. Морская служба *Copernicus* работает как для всего Мирового океана в целом, так и для отдельных морских бассейнов. В качестве прототипа взята система, которая разрабатывалась в ходе реализации европейских проектов *MyOcean* и *MyOcean2*.

Доступ к данным осуществляется через интерактивный *web*-портал, внешний вид которого приведен на рис. 1. Данные в системе Морской службы *Copernicus* представлены в виде продуктов, которые включают в себя как сами данные в цифровом виде, так и информацию о том, как получен продукт и какова его точность. Для этого к каждому продукту на *web*-портале привязано два документа: инструкция по использованию (*product user manual*) – содержит подробное описание процесса создания продукта, исходных данных, моделей, переменных, содержащихся в продукте, формата представления данных, механизмов загрузки цифровых массивов и т. п.; информационный документ качества продукта (*quality information document*) – содержит информацию об используемых алгоритмах для оценки качества данных и описание данных, относительно которых оценивалось качество продукта, а также сами оценки точности.

Интерактивный *web*-портал позволяет осуществлять выборку продуктов системы по следующим критериям: акватория, параметры, временной охват, тип данных.

Выборка продуктов проводится по следующим акваториям: Арктический регион, Балтийское море, северо-западный шельф Европы, Бискайский залив, Средиземное море, Черное море, Мировой океан. Расчет по каждой из указанных акваторий осуществляет соответствующий центр прогноза.

Имеется возможность осуществлять выборку продуктов системы в зависимости от набора информации, которая в них содержится. Доступны следующие параметры: температура, соленость, скорости течений, уровень морской поверхности, лед, ветер, оптика, химия, биология, хлорофилл.



Рис. 1. Интерактивный web-портал Морской службы Copernicus

Вкладка web-портала «временной охват» позволяет выбрать продукты, используя фактор времени. Имеются следующие категории: продукты прогнозирования; продукты реального времени; многолетние продукты; продукты, не зависящие от времени.

По типу содержащихся данных продукты делятся на три группы: результаты модельных расчетов, спутниковые измерения, *in situ* (натурные) измерения.

В данной работе приводится краткий обзор продуктов оперативной системы Морской службы Copernicus, доступных для Арктического региона. Деление этих продуктов по вышеописанным критериям представлено в таблице.

Рассмотрим продукты системы для Арктического региона в зависимости от типа содержащихся в них данных. Каждому продукту присвоено уникальное символическое имя.

Количество доступных продуктов системы для Арктического региона в зависимости от выбранного критерия

Критерии	Количество доступных продуктов
Параметры	
Температура	6
Соленость	4
Скорости течений	3
Уровень морской поверхности	8
Лед	7
Ветер	3
Оптика	5
Химия	3
Биология	2
Хлорофилл	7
Временной охват	
Продукты прогнозирования	2
Продукты реального времени	17
Многолетние продукты	10
Продукты, не зависящие от времени	0
Тип данных	
Результаты модельных расчетов	4
Спутниковые измерения	21
Измерения <i>in situ</i>	2

Результаты модельных расчетов. В Морской службе *Copernicus* для Арктического региона доступны результаты расчетов по четырем моделям, приведенным ниже. Первые две модели работают в оперативном режиме, соответствующие им продукты обновляются ежедневно.

Продукт *ARCTIC_ANALYSIS_FORECAST_PHYS_002_001_a* содержит результаты расчетов по физической модели *HYCOM* [2 – 4], осуществляющей 10-дневный цикл прогноза. Для ассимиляции данных, которая проводится один раз в неделю, используется фильтр Калмана [5, 6]. На выходе пользователю доступны поля температуры, солености, скоростей течений, уровня морской поверхности, толщины льда, скоростей движения льда, средней площади покрытия льдом (рис. 2).

Продукт *ARCTIC_ANALYSIS_FORECAST_BIO_002_004* содержит результаты расчетов по биологической модели *NORWECOM* [7], которая комплексирована с физической моделью *HYCOM*. Ежедневно осуществляется 10-дневный цикл прогноза, пользователю доступны осредненные за день параметры концентрации хлорофилла, нитратов, фитопланктона, фосфатов, углерода и кислорода.

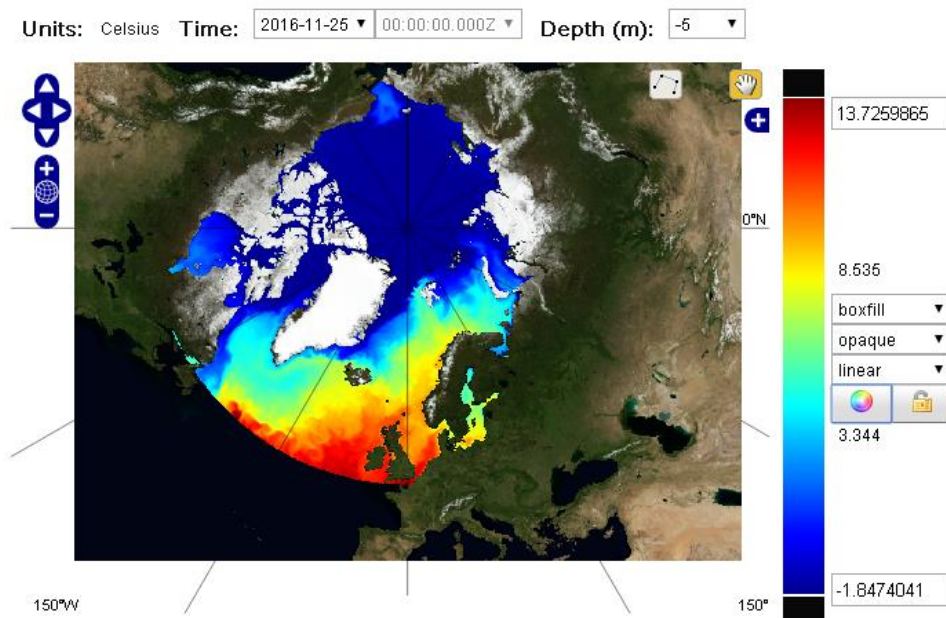


Рис. 2. Пример визуализации данных расчетов температуры морской поверхности, полученных с помощью физической модели *HYCOM*

Продукт *ARCTIC_REANALYSIS_PHYS_002_003* представляет собой ретроспективный анализ (реанализ) среднемесячных трехмерных физических полей Арктического региона за период 1991 – 2010 гг. При расчетах использовалась модель *HYCOM*, усваивались *in situ* и спутниковые данные с использованием фильтра Калмана.

Продукт *ARCTIC_REANALYSIS_BIO_002_005* содержит данные реанализа биологических полей состояния Арктического региона за период 01.01.2007 г. – 15.12.2010 г. Расчеты проведены с помощью модели *HYCOM – NORWECOM*, с 01.01.2008 г. усваивались спутниковые данные оптических сканеров с использованием фильтра Калмана.

Все продукты системы, кроме биологического реанализа, имеют пространственное разрешение 12,5 км. Данные биологического реанализа доступны с пространственным разрешением 25 км. Модельные расчеты выполнены на глубинах 5, 30, 50, 100, 200, 400, 700, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000 м.

Необходимо отметить, что центр прогноза, осуществляющий расчеты для всего Мирового океана, включает и Арктический регион. Результаты расчета полей состояния Мирового океана по гидродинамической модели представлены в продукте *GLOBAL_ANALYSIS_FORECAST_PHY_001_024*. Этот продукт получен на основе модели *NEMO* [8 – 10] версии 3.1, в которой используется сетка *C* Аракавы, пространственное разрешение по горизонтали составляет $1/12^\circ$ (~8 км), узлы по вертикали расположены на 50 неэквидистантных горизонтах. Пользователю доступны как осредненные за день, так и мгновенные на каждые 2 ч поля температуры, солености, скоростей течений, уровня морской поверхности, толщины льда, скоростей движения льда, сред-

ней площади покрытия льдом (рис. 3). Модель ассимилирует спутниковые измерения уровня и температуры морской поверхности, вертикальные профили температуры и солёности, учитывается также таяние айсбергов. В качестве атмосферного воздействия используются трехчасовые поля атмосферного форсинга из Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts – ECMWF*) [11], который ежедневно осуществляет 7-дневный цикл прогноза.

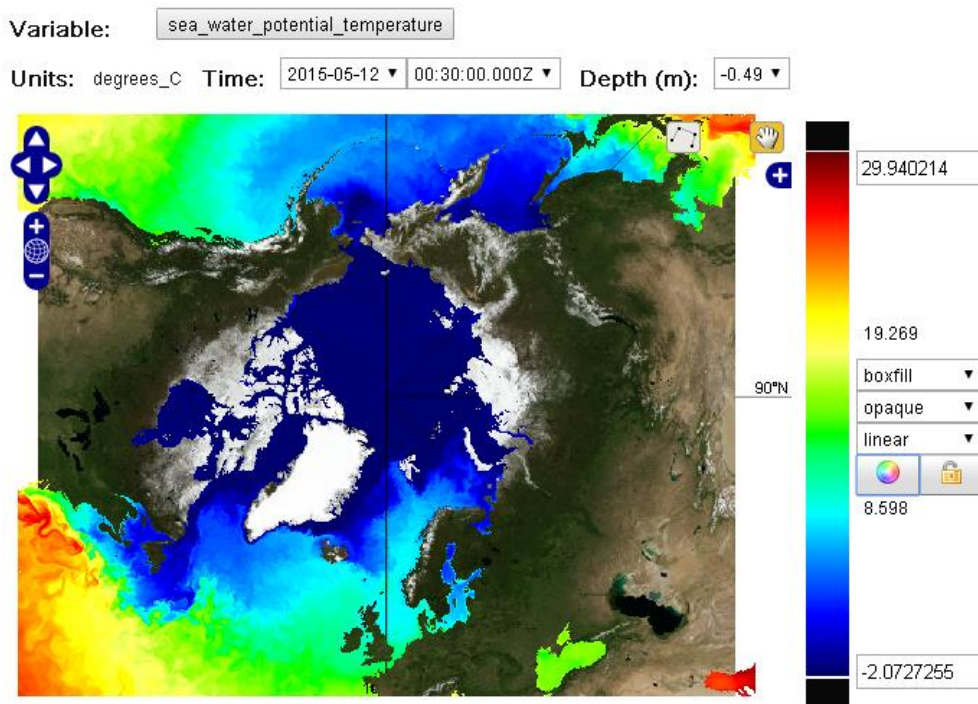


Рис. 3. Пример визуализации данных расчетов температуры морской поверхности, полученных с помощью физической модели *NEMO*

Спутниковые измерения. Температура. Продукт системы *SST_ARC_SST_L4_NRT_OBSERVATIONS_010_008_b* подготовлен Норвежским метеорологическим институтом (*MET.NO*) и содержит данные о температуре морской поверхности четвертого уровня обработки с пространственным разрешением $0,03 \times 0,03^\circ$. Для этого используются спутниковые данные радиометров в инфракрасном (ИК) и микроволновом диапазонах.

Дополнительно для Арктического региона Датским метеорологическим институтом (*DMI*) создан продукт *SEAICE_ARC_SEAICE_L4_NRT_OBSERVATIONS_011_008*, содержащий данные о температуре поверхности воды и льда с пространственным разрешением $0,05 \times 0,05^\circ$. Продукт подготавливается на основе измерений *AVHRR* радиометра, установленного на спутнике *MetOp-A*.

Оба продукта спутниковых измерений температуры морской поверхности обновляются ежедневно. Пример визуализации показан на рис. 4.

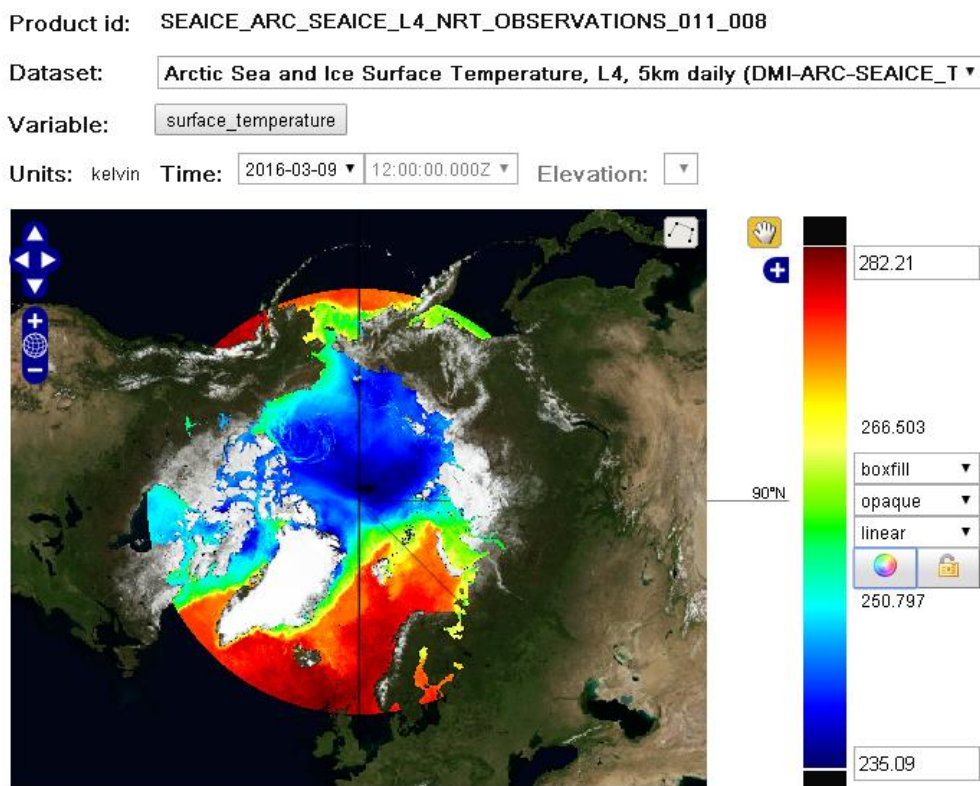


Рис. 4. Пример визуализации спутниковых данных температуры морской поверхности

Уровень морской поверхности. Центр подготовки и обработки спутниковых альтиметрических измерений (Тулуза, Франция) ежедневно выдает данные аномалий уровня морской поверхности как для всего Мирового океана, так и отдельно для Арктического региона (продукты *SEALEVEL_GLO_SLA_L3_NRT_OBSERVATIONS_008_017* и *SEALEVEL_ARC_SLA_L3_NRT_OBSERVATIONS_008_025* соответственно). Данные имеют третий уровень обработки, пространственное разрешение составляет 14 км. Также имеется продукт обработки альтиметрических измерений четвертого уровня *SEALEVEL_GLO_SLA_MAP_L4_NRT_OBSERVATIONS_008_026*, его пространственное разрешение составляет $0,25^\circ$, данные обновляются ежедневно, пользователю доступны осредненные за день поля.

Примеры визуализации этих продуктов показаны на рис. 5. Дополнительно к оперативным продуктам центр подготовки и обработки спутниковых альтиметрических измерений подготовил два продукта репроцессинга полей аномалий уровня морской поверхности. Продукт третьего уровня обработки *SEALEVEL_GLO_SLA_L3_REP_OBSERVATIONS_008_018* содержит информацию за период 25.09.1992 г. – 22.04.2015 г., пространственное разрешение составляет 7 км. Продукт четвертого уровня обработки *SEALEVEL_GLO_SLA_MAP_L4_REP_OBSERVATIONS_008_027* включает данные за период 01.01.1993 г. – 22.04.2015 г., пространственное разрешение составляет $0,25^\circ$.

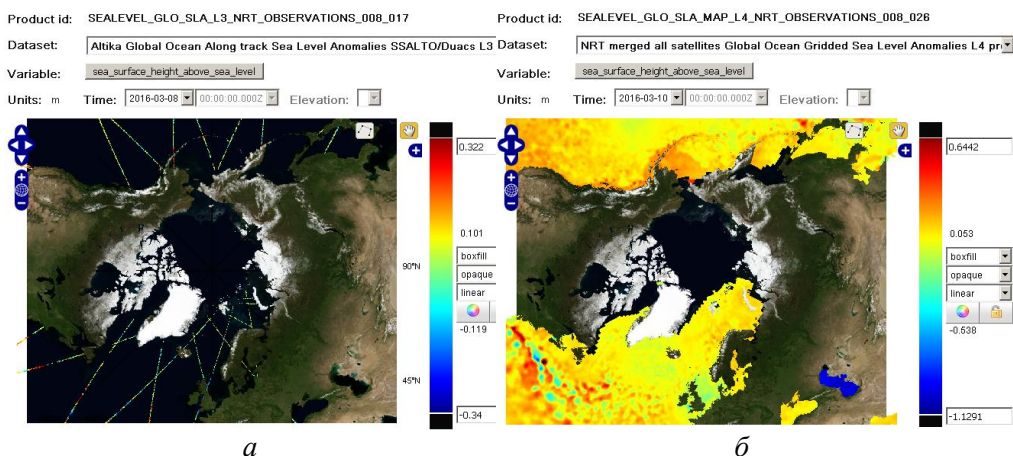


Рис. 5. Пример визуализации результатов обработки спутниковых альтиметрических измерений: *а* – треки спутниковых измерений уровня морской поверхности; *б* – карта аномалий уровня морской поверхности

Кроме того, имеются продукты, инвариантные ко времени: продукт *SEALEVEL_GLO_MDT_L4_REF_OBSERVATIONS_008_013*, который содержит информацию о средней динамической топографии всего Мирового океана, полученную осреднением данных альтиметрических измерений за 7 лет (1993 – 1999 гг.), пространственное разрешение 0,25°; продукт *SEALEVEL_GLO_REF20YTO7Y_L4_OBSERVATIONS_008_034* – добавка к средней динамической топографии за 7 лет для получения новой средней динамической топографии за 20 лет (1993 – 2012 гг.), пространственное разрешение 0,25°.

Лед. Для гренландских вод оперативная служба Датского метеорологического института выдает среднесуточные карты концентрации льда. Эти данные содержатся в продукте *SEAICE_ARC_SEAICE_L4_NRT_OBSERVATIONS_011_003*, который обновляется примерно 2 раза в неделю (рис. 6, *а*). Пространственное разрешение составляет 0,5 км. Данные доступны с 01.05.2009 г. по настоящее время.

Для вод от Восточной Гренландии до арх. Новая Земля оперативная служба Норвежского метеорологического института также выдает среднесуточные карты концентрации льда. Эти данные обновляются ежедневно в продукте *SEAICE_ARC_SEAICE_L4_NRT_OBSERVATIONS_011_002*, их пространственное разрешение составляет 1 км. Карты доступны с 01.04.2010 г. по настоящее время. Так же, как и для продукта *SEAICE_ARC_SEAICE_L4_NRT_OBSERVATIONS_011_003*, здесь используются данные локаторов с синтезированной апертурой, установленных на спутниках *Envisat* (до апреля 2012 г.), *Radarsat* и *Sentinel-1*, а также данные сканеров *MODIS* и спутников *NOAA* в видимом и ИК-диапазонах.

Дополнительно Датский метеорологический институт на нерегулярной основе подготавливает данные о концентрации айсбергов с пространственным разрешением 10 км на основе использования локаторов с синтезированной апертурой. Эта информация содержится в продукте *SEAICE_ARC_SEAICE_L4_NRT_OBSERVATIONS_011_007*.

Продукт *SEAICE_ARC_SEAICE_L3_REP_OBSERVATIONS_011_010* содержит данные о дрейфе льда в Арктическом регионе (рис. 6, б). Он подготовлен на основе измерений скаттерометров *ASCAT* и *QuikSCAT*, а также их комбинации с радиометрическими данными. Пространственное разрешение составляет $0,5^\circ$, доступны данные, осредненные за неделю и за месяц в период 01.10.1999 г. – 30.04.2012 г.

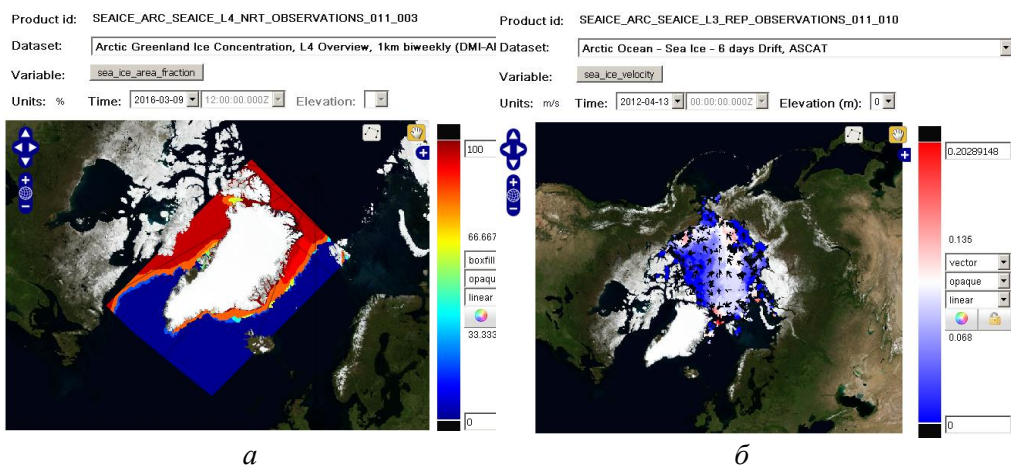


Рис. 6. Пример визуализации результатов обработки спутниковых измерений: *а* – карта концентрации льда; *б* – карта дрейфа льда

Ветер. Для всего Мирового океана, включая Арктический регион, через Морскую службу *Copernicus* доступны данные о скорости приводного ветра. Они содержатся в трех продуктах системы:

- продукт *WIND_GLO_WIND_L3_NRT_OBSERVATIONS_012_002*, подготавливается на основе дистанционных измерений скаттерометров *ASCAT* и *OSCAT*, пространственное разрешение $0,125^\circ$. Данные доступны с 12.03.2012 г., обновляются ежедневно (рис. 7, *а*);

- продукт *WIND_GLO_WIND_L4_NRT_OBSERVATIONS_012_004*, подготавливается на основе дистанционных измерений скаттерометров *ASCAT*, *OSCAT* и данных *ECMWF*. Пространственное разрешение $0,25^\circ$, временное разрешение 6 ч. Данные доступны с 15.11.2012 г. (рис. 7, *б*);

- продукт *WIND_GLO_WIND_L4_REP_OBSERVATIONS_012_003*, содержит репроцессинг полей скорости приводного ветра на основе данных скаттерометра *ASCAT* за период 16.05.2007 г. – 16.04.2012 г. Пространственное разрешение составляет 25 км, данные осреднены за месяц.

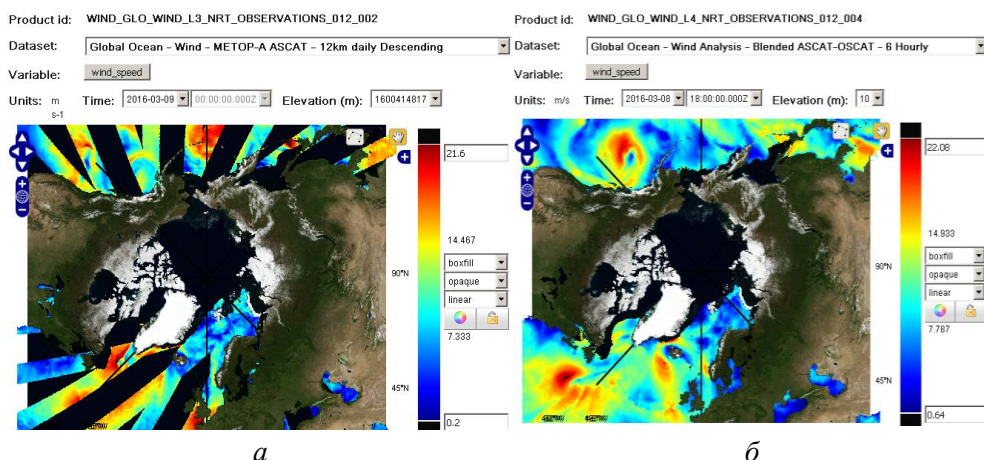


Рис. 7. Пример визуализации результатов обработки спутниковых измерений скаттерометров: *a* – третий уровень обработки; *б* – четвертый уровень обработки

Оптика. Морская лаборатория (Плимут, Англия) подготавливает для Морской службы *Copernicus* по Арктическому региону продукты, содержащие данные о коэффициенте диффузного ослабления света на длине волны 490 нм, а также об отражательной способности морской поверхности. Продукт *OCEANCOLOUR_ARC_OPTICS_L3_NRT_OBSERVATIONS_009_046* содержит осредненные за день спутниковые данные, обновляется ежедневно и доступен в режиме, близком к реальному времени (*near real time* – *NRT*), а также в режиме временной задержки (*delay time* – *DT*). В режиме *DT* данные предоставляются с задержкой в несколько дней, но имеют лучшее качество за счет использования метеорологической и навигационной информации.

Продукт *OCEANCOLOUR_ARC_OPTICS_L3_REP_OBSERVATIONS_009_068* создан на основе использования данных сканеров *SeaWiFS*, *MODIS/Aqua* и *MERIS* и содержит репроцессинг следующих полей: отражательной способности морской поверхности, коэффициента поглощения излучения растворенным органическим веществом и минеральной взвесью, коэффициента поглощения излучения фитопланктоном, коэффициента обратного рассеяния гидрозолями, коэффициента поглощения излучения для фотосинтетически активной радиации. Продукт включает осредненные за день поля за период 04.09.1997 г. – 31.07.2012 г. Пространственное разрешение составляет 1 км.

Хлорофилл. Морская лаборатория в г. Плимут в оперативном режиме выдает данные сканеров *MODIS* и *VIIRS* о концентрации хлорофилла в морской воде. Эта информация содержится в продукте *OCEANCOLOUR_ARC_CHL_L3_NRT_OBSERVATIONS_009_047*. Данные получены путем использования региональных алгоритмов *OC5* [12, 13] и *OC488* [14]. Доступ к данным возможен в двух режимах – *NRT* и *DT*. Данные *DT* предоставляются с задержкой в несколько дней и также имеют лучшее качество за счет использования метеорологической и навигационной информации. Пространственное разрешение составляет 1,2 км. Архив содержит данные с 31.10.2013 г. по настоящее время.

Продукт *OCEANCOLOUR_ARC_CHL_L3_REP_OBSERVATIONS_009_069* представляет собой репроцессинг полей концентрации хлорофилла в морской воде на основе использования данных сканеров *SeaWiFS*, *MODIS/Aqua* и *MERIS*. Применяются региональные алгоритмы *OC5* и *OC488*. Пользователям Морской службы программы *Copernicus* доступны осредненные за день поля за период 04.09.1997 г. – 31.07.2012 г.

Измерения *in situ*. Для Арктического региона имеется два продукта, содержащих информацию о натуральных измерениях. Продукт *INSITU_ARC_NRT_OBSERVATIONS_013_031* обновляется ежедневно и содержит данные *in situ* измерений в режиме, близком к реальному времени (время задержки составляет до 48 ч, при этом осуществляется автоматический контроль качества данных). Архив содержит информацию с 10.10.2010 г. по настоящее время. Данные измерений предоставляют члены сообщества *Arctic ROOS* [15]. Продукт включает информацию по температуре, солёности, компонентам скоростей течений, уровню морской поверхности, хлорофиллу, кислороду.

Продукт *INSITU_ARC_TS_REP_OBSERVATIONS_013_037* содержит архивные данные *in situ* измерений температуры и солёности за период 10.10.1990 г. – 31.12.2013 г. Данные предоставлены членами сообществ *Arctic ROOS* и *SeaDataNet NODCs*.

Выводы. Служба мониторинга морской среды *Copernicus* имеет довольно широкий спектр продуктов оперативной системы для Арктического региона. Эти данные находятся в свободном доступе, регулярно обновляются и пополняются. Важно подчеркнуть, что каждому продукту системы дано подробное описание в руководстве пользования, приведены также данные о его точности. Система обладает удобным инструментарием для визуализации и анализа данных. Морская служба *Copernicus* регулярно сообщает об обновлениях и изменениях в продуктах системы, а также механизмах доступа к ним. Эта информация отправляется по электронной почте пользователям и доступна на новостной ленте *web*-портала.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2014-0011 «Исследования закономерностей изменений состояния морской среды на основе оперативных наблюдений и данных системы диагноза, прогноза и реанализа состояния морских акваторий» (шифр «Оперативная океанография»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <http://marine.copernicus.eu>.
2. *Bleck R., Boudra D.B.* Initial testing of a numerical ocean circulation model using a hybrid (quasi-isopycnic) vertical coordinate // *J. Phys. Oceanogr.* – 1981. – 11, No. 6. – P. 755 – 770.
3. *Halliwel G., Bleck R., Chassignet E.* Atlantic Ocean simulations performed using a new hybrid-coordinate ocean model // *EOS, Trans. AGU, Fall 1998 AGU meeting.*
4. *Bleck R.* An oceanic general circulation model framed in hybrid isopycnic-cartesian coordinates // *Ocean Model.* – 2002. – 4, No. 1. – P. 55 – 88.

5. *Kalman R.E.* A new approach to linear filtering and prediction problems // *J. Basic Engineer.* – 1960. – 82, No. 1. – P. 35 – 45.
6. *Evensen G.* The ensemble Kalman filter: Theoretical formulation and practical implementation // *Ocean Dyn.* – 2003. – 53, No. 4. – P. 343 – 367.
7. *Aksnes D.L., Ulvestad K.B., Balino B.M. et al.* Ecological modeling in coastal waters: towards predictive physical-chemical-biological simulation models // *Ophelia*. – 1995. – 41, No. 1. – P. 5 – 36.
8. <http://www.nemo-ocean.eu>.
9. *Madec G.* NEMO reference manual, ocean dynamic component: NEMO-OPA // Note du Pôle de modélisation. Technical Report. – France: Institut Pierre Simon Laplace, 2008. – 27.
10. *Dombrowsky E., Bertino L., Chanut J. et al.* NEMO in MyOcean Monitoring and Forecasting Centers (MFCs) // *Mercator Ocean Quart. Newsl.* – 2012. – No. 46. – P. 31 – 45.
11. <http://www.ecmwf.int>.
12. *Gohin F., Druon J., Lampert L.* A five channel chlorophyll concentration algorithm applied to SeaWiFS data processed by SeaDAS in coastal waters // *Int. J. Rem. Sens.* – 2002. – 23, No. 8. – P. 1639 – 1661.
13. *O'Reilly J.E., Maritorena S., Mitchell B.G. et al.* Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS // *J. Geophys. Res.* – 1998. – 103, No. C11. – P. 24937 – 24953.
14. *McClain C.R., Arrigo K.R., Esaias W. et al.* SeaWiFS Quality Control Masks and Flags: Initial Algorithms and Implementation Strategy. – Greenbelt, Maryland: NASA Goddard Space Flight Center, 1995. – P. 3 – 7.
15. <http://arctic-roos.org>.

Overview of the *Copernicus* Marine Environment Monitoring Service products available for the Arctic region

A.L. Kholod

*Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
e-mail: antonholod@mail.ru*

The products available due to the operational system of the *Copernicus* Marine Environment Monitoring Service are overviewed. The products of model calculations, and the satellite and *in situ* measurements for the Arctic region are considered. Spatial and temporal characteristics of the products are given; the results of the system products' visualization by the integrated tools are shown.

Keywords: Arctic, model, satellite measurements, *in situ* measurements, products, *Copernicus* Marine Environment Monitoring Service, visualization.