УДК 551.46

КОМПЛЕКСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ ДЛЯ РАСЧЁТА ТРАЕКТОРИЙ ПЛАВАЮЩИХ ОБЪЕКТОВ НА МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

А. А. Кубряков [1,2]***, С. В. Станичный*** [1]***, Е. И. Калинин*** [1]

[1] Морской гидрофизический институт, Севастополь (МГИ)
[2] Санкт-Петербургский государственный университет (СПГУ)

В работе на основе комплексного использования спутниковых данных предлагается система, позволяющая рассчитывать и прогнозировать траектории перемещения плавающих объектов на акватории всего Мирового океана. В основу системы легли методы расчёта полных поверхностных течений Мирового океана на основе измерений спутниковых альтиметров и скаттерометров и данных атмосферных реанализов. Сопоставление с данными радиолокационных измерений показало, что предложенный метод позволяет достаточно хорошо определять перемещение нефтяных загрязнений на морской поверхности и оценивать распространение речных вод в океане. Для примера в работе данная методика была использована для расчёта распространения загрязнённых радиоактивных вод после аварии на атомной электростанции Фукусима-1. Показано, что заражённые воды двигаются на восток, практически до берегов Северной Америки, где захватываются Калифорнийским течением и переносятся далее на юг. На основе предложенного метода была создана система расчёта перемещения плавающих объектов FOTS (Floating Object Tracking System). Система реализована в виде автономной программы с дружественным пользовательским интерфейсом. Для расчёта траектории объекта или группы объектов система использует современные спутниковые и метеорологические архивы данных, находящихся в свободном доступе в интернете.

Работа выполнена при поддержке грантов Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских учёных-кандидатов наук (МК-2015) МК-5787.2015.5.

Ключевые слова: моделирование траекторий лагранжевых частиц, нефтяные загрязнения, загрязнение вод, поверхностные течения, спутниковый мониторинг.

ВВЕДЕНИЕ

Расчёт траекторий плавающих объектов на морской поверхности необходим для решения большого количества важных прикладных задач. К ним относятся, например, определение переноса нефтяных или иных загрязняющих веществ в океане; расчёт переноса обломков судов или самолётов после кораблекрушений и авиакатастроф и поиск экипажей после аварий на воде; определение направления движения айсбергов и плавающих льдин, представляющих опасность для судоходства. Кроме того, они могут быть использованы для

Кубряков Арсений Александрович — научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, arskubr@yandex.ru
Станичный Сергей Владимирович — заведующий отделом, кандидат физико-математических наук
Калинин Евгений Игоревич — младший научный сотрудник

решения ряда фундаментальных задач, например, определения причин изменчивости ареалов распространения речных вод [Зацепин и др., 2015; Кубряков и др., 2013] или биологических объектов (например, [Rudorff et al., 2009]) при разных метеоусловиях.

Большинство существующих в настоящее время методов расчёта траекторий плавающих объектов использует в своей основе трёхмерные гидродинамические модели различной сложности [Коротенко, Мамедов, 2001; Kubryakov et al., 2012], в рамках которых результаты расчётов во многом зависят от точности расчётов атмосферных моделей (потоков тепла, влаги и т. д.) и большого количества используемых параметризаций (турбулентной диффузии, диссипации и т. д.).

В настоящей работе предлагается метод расчёта перемещения плавающих объектов, который базируется только на данных спутниковых измерений и атмосферных реанализов. На основе данного метода была создана система FOTS (Floating Object Tracking System), которая позволяет определять траектории плавающих объектов в любой точке Мирового океана.

МЕТОД РАСЧЁТА

Скорость частицы на поверхности можно определить из уравнения Навье-Стокса:

$$\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t} + \mathbf{m} \times f\mathbf{V} = -g\nabla h + \frac{1}{\rho}\frac{d\tau}{\partial z}. \tag{1}$$

Здесь V — скорость; τ — напряжение трения ветра; h — уровень моря; ρ —плотность; g — ускорение свободного падения; f — параметр Кориолиса; z — глубина; $\mathbf{m} = \{-1, 1, 0\}$.

Первый член уравнения (1) описывает нелинейные члены в уравнении движения, которые можно считать малыми вдали от пограничных областей океана. Локальный градиент уровня моря считается не зависимым от напряжения трения ветра [Luther et al., 1990]. Тогда уравнение (1) можно разделить на два:

$$\mathbf{m} \times f\mathbf{V}_g = -g\nabla h; \tag{2}$$

$$\mathbf{m} \times f\mathbf{V}_e = -\frac{1}{\rho}\frac{d\tau}{\partial z}. \tag{3}$$

Здесь $\mathbf{V}_g$ — поверхностная геострофическая скорость течений; $\mathbf{V}_e$ — дрейфовая скорость. Суммарная скорость поверхностных течений V будет равна $V = \mathbf{V}_g + \mathbf{V}_e$.

Геострофическая скорость определяется по спутниковым альтиметрическим измерениям. Комбинированные измерения спутниковых альтиметров позволяют рассчитывать ежесуточные карты аномалий уровня моря на регулярной сетке с разрешением 1/4° [Le Traon et al., 2001]. Полная динамическая топография h определяется как сумма альтиметрических аномалий уровня моря и средней динамической топографии — специальной геофизической кор-

рекции к данным альтиметров. Для глобального массива данных используется средняя динамическая топография из работы [Rio et al., 2011], для Чёрного моря — из работы [Kubryakov, Stanichny, 2012]. Геострофические скорости рассчитываются из уравнения (2) по градиентам динамической топографии.

Дрейфовая компонента течений V_e была параметризована по данным измерений дрифтеров, альтиметров и ветра в работе [Stanichny et al., 2015]. Дрейфовая компонента течений определялась как $V_e = 0{,}028 V_w e^{i\pi/36}$, где V_w — скорость ветра, т. е. скорость дрейфовых течений на поверхности составляла 2,8 % от скорости ветра, а угол поворота поверхностных течений составил 13° вправо. Для определения скорости ветра используются либо данные атмосферных реанализов NCEP (National Centers for Environmental Prediction) (или MERRA (Modern Era Retrospective-Analysis for Research and Applications)), либо спутниковые измерения скаттерометра QuikSCAT. Данные NCEP имеют разрешение 1° и 6 ч (http://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov/), данные MERRA — 0,5×0,66° и 6 ч (http://goldsmr2.sci.gsfc.nasa.gov/). Данные о скорости ветра по измерениям QuikSCAT в средних широтах доступны примерно два раза в сутки в 1999–2009 гг., имеют пространственное разрешение ~12,5 км и были получены из архива Jet Propulsion Laboratory (http://podaac.jpl.nasa.gov/).

Полная поверхностная скорость течений определяется как сумма $V = V_g + V_e$. Пример поля геострофической скорости, поля скорости ветра и восстановленной карты полных поверхностных течений за 28 декабря 2012 г. приведён на рис. 1.

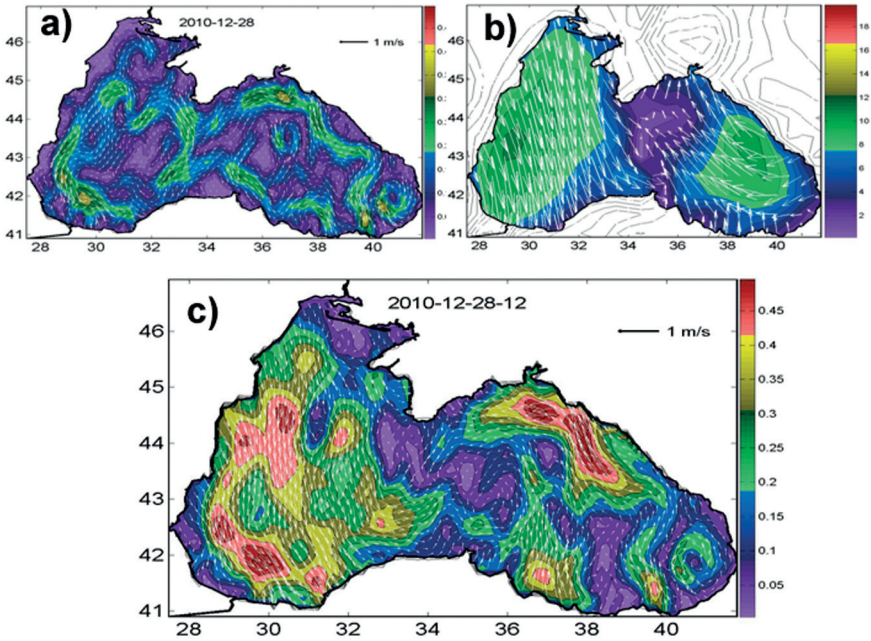

Рис. 1. Пример поля геострофической скорости (**a**), поля скорости ветра по данным NCEP (**b**) и восстановленной карты полных поверхностных течений (**c**) за 28 декабря 2010 г. 12:00 UTC (Coordinated Universal Time)

Для восстановления лагранжевой траектории частиц по эйлеровым полям скорости координаты виртуального объекта r^n на шаге расчёта n определялись по схеме Эйлера как:

$$r_{n+1} = r_n + V(r_n)\,\mathrm{d}t,$$

здесь V — поверхностная скорость течений, линейно интерполированная на точку с координатами x_n, y_n; $\mathrm{d}t$ — шаг расчётов по времени.

Для учёта нелинейных членов и турбулентных процессов на каждом шаге времени частице задаётся дополнительное перемещение $\mathrm{d}l$, пропорциональное скорости частицы:

$$\mathrm{d}l = PK_T\,\mathrm{d}L,$$

здесь P — случайная величина (от 0 до 1); значение $K_T = 0{,}1$ является аналогом коэффициента турбулентной горизонтальной диффузии; $\mathrm{d}L = r_{n+1} - r_n$ — перемещение частицы на данном шаге.

ПРИМЕРЫ РАСЧЁТА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПЛАВАЮЩИХ ОБЪЕКТОВ

На рис. 2 представлен пример использования предложенного метода для расчётов перемещения нефтяной плёнки, зафиксированной на двух последовательных радиолокационных снимках в Чёрном море. Красной линией на рис. 2 представлен контур нефтяной плёнки, наблюдавшийся на снимке RadarSat-on в 03:43 UTC 31.03.2011 г. и Envisat-1 в 07:43 UTC 31.03.2011 г. Результат расчёта перемещения центра масс из точки с координатами 36,95°E, 44,47°N представлен на рис. 2 жёлтой линией. Фиолетовыми точками показано вероятное перемещение плёнки с учётом горизонтальной турбулентности. Как видно из рис. 2, предложенная модель успешно воспроизвела направление движения и расстояние, на которое переместилось нефтяное пятно.

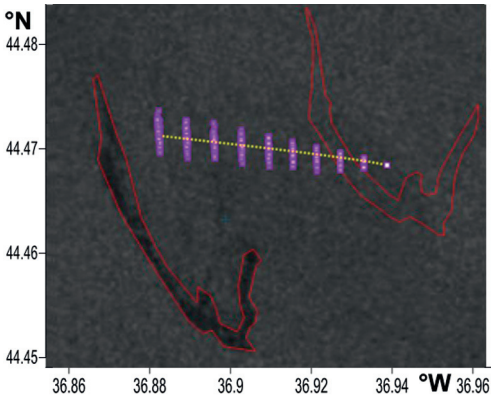

Рис. 2. Смещение нефтяного пятна (контуры — красная линия) по данным последовательных радиолокационных наблюдений на снимках RadarSat-on в 03:43 UTC 31.03.2011 г. и Envisat-1 в 07:43 UTC 31.03.2011 г. и по результатам расчёта (фиолетовые точки, жёлтая линия). Источник (http://ocean.kosmosnimki.ru/). Данные любезно предоставлены Инженерно-технологическим центром «СканЭкс»

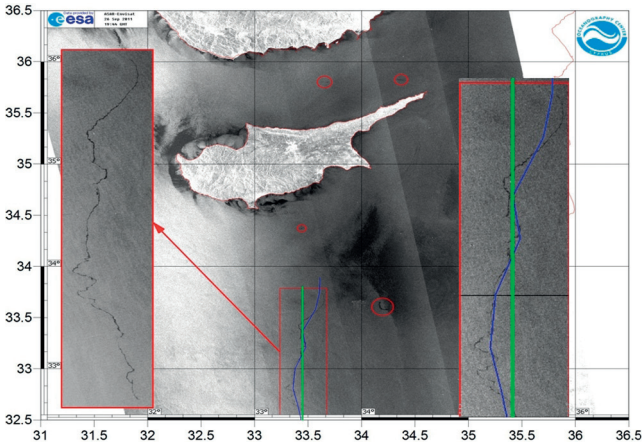

Рис. 3. Радиолокационное изображение ASAR за 26 сентября 2011 г. Зелёная линия — примерный курс проходящего судна, синяя линия — результаты расчёта

Ещё один пример тестирования модели показан на рис. 3. Продолговатый слик необычной формы, вероятно вызванный разливом с проходящего судна, был зафиксирован в Средиземном море на снимке ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar) 26 сентября 2011 г. Такая форма пятна, скорее всего, связана с его смещением под действием поверхностных течений. Для моделирования перемещения этого слика задавался примерный курс проходящего судна (зелёная линия). Расчёт перемещения нефти от заданного курса, представленный на рис. 3 синей линией, хорошо совпадает с данными радиолокационных снимков. Смещение южной части пятна на запад, а северной — на восток было преимущественно вызвано действием мощного антициклонического вихря, хорошо видного по данным спутниковой альтиметрии.

Предложенный метод был также использован для расчёта распространения радиоактивных веществ после аварии на атомной электростанции Фукусима (Япония) в 2011 г. (рис. 4). Для расчёта в точке вблизи аварии с координатами 141,1°E, 35,65°N задавался точечный разлив. Начало расчёта совпадало со временем аварии — 11 марта 2011 г. Расчёт был проведён на 1 год. Результаты представлены на рис. 4. Радиоактивные вещества попали в струю течения Куросио и перемещались на восток. Через примерно 1,5 года они практически достигают восточного берега Северной Америки в районе Калифорнии. Здесь они захватываются Калифорнийским течением и переносятся далее на юг.

Использование подхода, основанного на спутниковых измерениях, позволяет также проводить фундаментальные исследования. На рис. 5 представлен расчёт распространения речных вод от устья Дуная в Чёрном море и его сопоставление с оптическими спутниковыми измерениями MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Для расчёта вблизи устья Дуная были установлены четыре постоянных источника виртуальных частиц. Рассчитанная концентрация виртуальных частиц (рис. 5 — слева) хорошо согласуется с зоной повышенных значений концентрации *хлорофилла а*, характерных для мутных и богатых биогенами шельфовых вод [Кубряков и др., 2013].

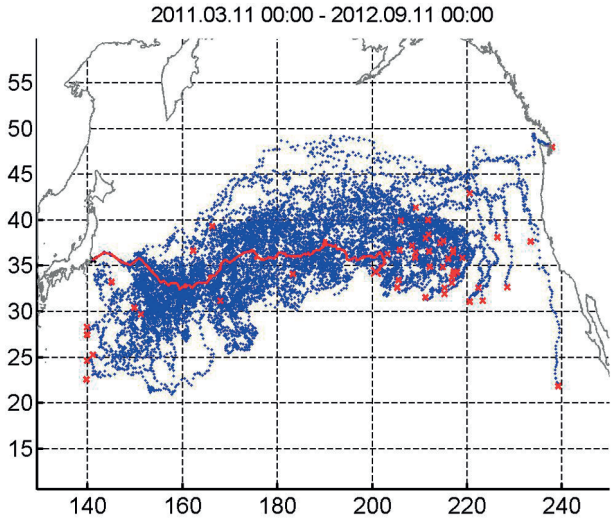

Рис. 4. Моделирование распространения заражённых вод после аварии на атомной электростанции Фукусиме в 2011 г. Красной линией — показано наиболее вероятное перемещение вод. Синяя линия, и красные крестики показывают вероятные траектории и положения заражённых вод с учётом турбулентности

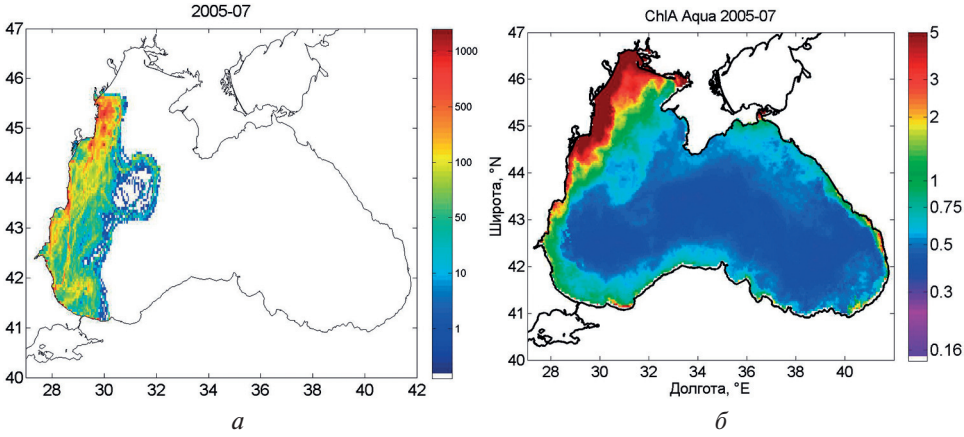

Рис. 5. Рассчитанная концентрация виртуальных трассеров, распространяющихся от устья Дуная в летний период 2005 г. в Чёрном море (*а*). Средняя концентрация *хлорофилла а* в июле 2005 г. по данным MODIS (*б*)

КОМПЛЕКС РАСЧЁТА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПЛАВАЮЩИХ ОБЪЕКТОВ FLOATING OBJECT TRACKING SYSTEM

На основе предложенного метода была создана система расчёта перемещения плавающих объектов FOTS. Созданная система позволяет рассчитывать распространение не только пассивных частиц в океане, но и нефтяных загрязне-

ний с учётом процессов, влияющих на их динамику и массообмен с окружающей средой (т. е. растекания, испарение и т. д.). Параметризация этих процессов подробно описана в статье [Матвеев и др., 2015]. Кроме того, при расчёте траектории частиц в северных морях система учитывает ледовую обстановку в регионе.

Разработанная система позволяет рассчитывать перемещение точечного объекта (пример — единичный разлив загрязняющих веществ, обломки судна, льдина), группы объектов (разлив пятна нефти), распространение вещества от постоянного источника (авария на буровой платформе), как в прямом направлении с возможностью прогноза на три дня от текущего момента, так и в обратном направлении для определения источника загрязнений. Для учёта различной парусности объекта в системе имеется возможность задавать дрейфовый коэффициент вручную (например, для расчёта перемещения высокого айсберга).

Система представлена в виде отдельного приложения, которое легко устанавливается на персональный компьютер пользователя. Для работы системы требуется только подключение к интернету. Интерфейс программного комплекса представлен на рис. 6. Для расчёта задаётся начальная координата и время расчёта. После этого из бесплатных архивов спутниковых данных загружаются необходимые данные об аномалиях уровня моря и скорости ветра, рассчитываются полные поверхностные скорости течений и определяется траектория плавающего объекта. Карты скоростей ветра и течений и результаты расчёта траектории выводятся на компьютер пользователя в графическом и цифровом формате (ASCII).

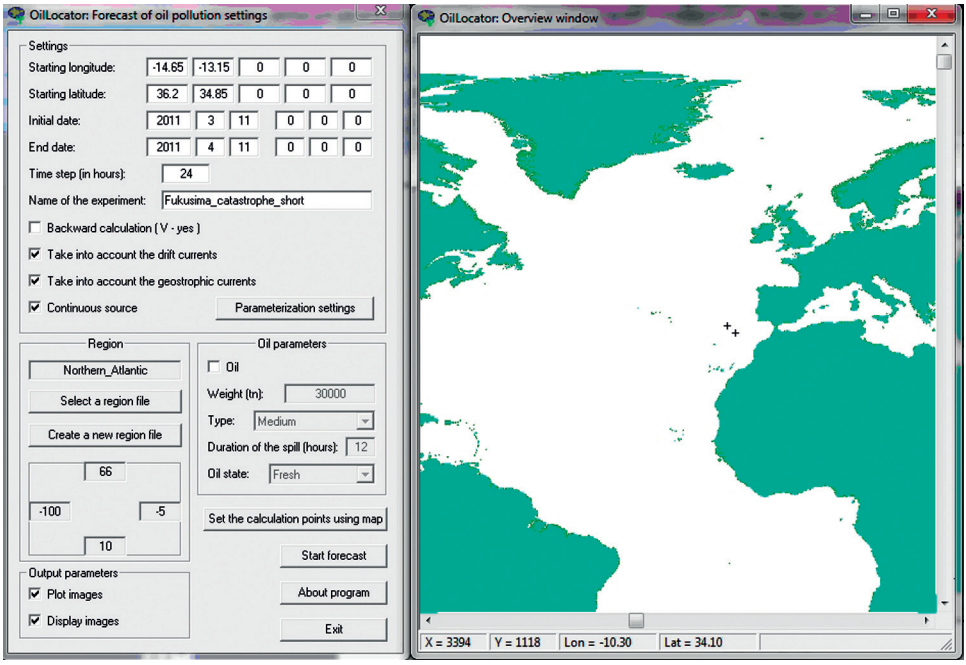

Рис. 6. Интерфейс программы FOTS

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе разработан метод, позволяющий на основе спутниковых альтиметрических измерений и данных о ветре рассчитывать перемещение плавающих объектов на поверхности моря. Метод был успешно опробован на основе сопоставления с данными радиолокационных и оптических снимков в различных морях Мирового океана. На основе предложенного метода в виде отдельного Windows-приложения была создана система расчёта перемещения плавающих объектов FOTS.

ЛИТЕРАТУРА

[Зацепин и др., 2015] *Зацепин А. Г.*, *Кременецкий В. В.*, *Кубряков А. А.*, *Станичный С. В.*, *Соловьев Д. М.* Распространение и трансформация вод поверхностного опреснённого слоя в Карском море // Океанология. 2015. Т. 55. № 4. С. 502–513.

[Коротенко, Мамедов, 2001] *Коротенко К. А.*, *Мамедов Р. М.* Моделирование процесса распространения пятен нефти в прибрежной зоне Каспийского моря // Океанология. 2001. Т. 41. № 1. С. 42–52.

[Кубряков и др., 2013] *Кубряков А. А.*, *Станичный С. В.*, *Зацепин А. Г.*, *Кременецкий А. Г.* Распространение речных вод в Чёрном и Карском морях по спутниковым измерениям уровня, солёности и *хлорофилла а* // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2013. № 27. С. 394–398.

[Матвеев и др., 2015] *Матвеев А. Я.*, *Кубряков А. А.*, *Боев А. Г.*, *Бычков Д. М.*, *Иванов В. К.*, *Станичный С. В.*, *Цымбал В. Н.* Моделирование растекания нефти в задаче радиолокационной многоугловой диагностики загрязнений морской поверхности // Исслед. Земли из космоса. 2015. Т. 6. № 20. С. 20–30.

[Kubryakov et al., 2012] *Kubryakov A. I.*, *Korotayev G. K.*, *Thoorens F. X.*, *Liungman O.*, *Ambjorn C.* New tool for the Black Sea environmental safety: BlackSea Track Web: abstr. // EGU General Assembly Conference Abstracts. 2012. V. 14. P. 4432.

[Kubryakov, Stanichny, 2012] *Kubryakov A. A.*, *Stanichny S. V.* Reconstruction of mean dynamic topography of the Black Sea for altimetry measurements // Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. 2012. V. 48(9). P. 973–979.

[Le Traon et al., 2001] *Le Traon P. Y.*, *Dibarboure G.*, *Ducet N.* Use of a high-resolution model to analyze the mapping capabilities of multiple-altimeter missions // J. Atmospheric and Oceanic Technology. 2001. V. 18(7). P. 1277–1288.

[Luther et al., 1990] *Luther D. S.*, *Chave A. D.*, *Filloux J. H.*, *Spain P. F.* Evidence for local and nonlocal barotropic responses to atmospheric forcing during BEMPEX // Geophysical Research Letters. 1990. V. 17(7). P. 949–952.

[Rio et al., 2011] *Rio M. H.*, *Guinehut S.*, *Larnicol G.* New CNES-CLS09 global mean dynamic topography computed from the combination of GRACE data, altimetry, and in situ measurements // J. Geophysical Research. 2011. V. 116. Iss. C7. doi: 10.1029/2010JC006505.

[Rudorff et al., 2009] *Rudorff C. A. G.*, *Lorenzzetti J. A.*, *Gherardi D. F.*, *Lins-Oliveira J. E.* Application of remote sensing to the study of the pelagic spiny lobster larval transport in the tropical Atlantic // Brazilian J. Oceanography. 2009. V. 57(1). P. 7–16.

[Stanichny et al., 2015] *Stanichny S. V.*, *Kubryakov A. A.*, *Soloviev D. M.* Parameterization of surface wind-driven currents in the Black Sea using drifters, wind and altimetry data // Ocean Dynamics. 2015. URL: http://dx.doi.org/ 10.1007/s10236-015-0901-3.

SYNERGETIC USE OF SATELLITE DATA FOR THE CALCULATION OF THE TRAJECTORIES OF FLOATING OBJECTS ON THE SEA SURFACE

A. A. Kubryakov [1,2], *S. V. Stanichny* [1], *E. I. Kalinin* [1]

[1] Marine Hydrophysical Institute, Sevastopol (MHI)
[2] Saint-Petersburg State University (SPSU)

In this paper, we present a system that allows to calculate and predict the path of the floating objects in the entire world ocean using the synergetic satellite data. The system is based on the methods of the total surface currents calculations from the measurements of satellite altimeters and scatterometers and atmospheric reanalysis data. Comparison with the data of radar measurements showed that the proposed method allows to reasonably well determine the displacement of oil slicks on the sea surface and estimate the propagation of river water in the ocean. As an example, the method was used to calculate the spread of radioactive contaminated water after the accident at the nuclear power plant Fukushima-1. It was shown that contaminated water moves to the east, almost to the shores of North America, and then are captured by California current and carried to the south. On the basis of the proposed method the floating object tracking system (FOTS) was created. Implementation of the system is designed as a stand-alone program with a friendly user interface. To calculate the trajectory of the object or group of objects, the system uses modern satellite and meteorological data files, which are freely available on the Internet.

Keywords: lagrangian modelling, oil pollution, water pollution, surface currents, satellite monitoring.

Kubryakov Arseny Alexandrovich — research associate, PhD, arskubr@yandex.ru
Stanichny Sergey Vladimirovich — head of department, PhD
Kalinin Jevgenij Igorevich — junior researcher