

Прогноз циркуляционных процессов и распространения нефтяного загрязнения в восточной части Черного моря на основе региональной комплексной модели

© 2015 А.А. Кордзадзе, Д.И. Деметрашвили

*Институт геофизики им. М. Нодиа
Тбилисского государственного университета им. Ив. Джавахишвили, Грузия
E-mail: akordzadze@yahoo.com*

Поступила в редакцию 03.06.2014 г. После доработки 08.07.2014 г.

Региональная система краткосрочного прогноза динамического состояния восточной части Черного моря (жидкая граница проходит вдоль $39,08^\circ$ в. д.) расширена путем включения в нее модели распространения нефтяного загрязнения. Модель основана на решении двумерного уравнения переноса – диффузии для неконсервативной примеси. Наряду с прогнозом полей течений, температуры и солености, в случае необходимости предложенная система позволяет прогнозировать также распространение нефтяного загрязнения на 3 сут с пространственным разрешением 1 км. Численные эксперименты, проведенные для случаев разных местоположений гипотетического источника загрязнения в условиях реальных циркуляционных режимов, показывают существенную роль динамических процессов в формировании особенностей пространственно-временного распределения загрязнения.

Ключевые слова: поле течения, численная модель, метод расщепления, диффузия, нефтяное пятно.

Введение. В Институте геофизики Тбилисского государственного университета им. Ив. Джавахишвили в сотрудничестве с Морским гидрофизическим институтом (МГИ) в рамках европейских научных проектов создана региональная система краткосрочного прогноза динамического состояния восточной части Черного моря (жидкая граница проходит вдоль $39,08^\circ$ в. д.). Данная система представляет собой одну из частей системы диагноза и прогноза состояния Черного моря в масштабах всего бассейна [1 – 6]. Общая схема функционирования региональной системы и некоторые результаты прогноза динамических характеристик в восточной части морского бассейна описаны в работах [7 – 11]. Основным компонентом системы является региональная модель динамики Черного моря (РМ-ИГ), которая получена путем адаптации бароклинной модели Черного моря Института геофизики [12, 13] к восточной акватории моря с одновременным повышением разрешающей способности от 5 до 1 км. Расчетная сетка региональной модели вложена в сетку модели динамики Черного моря МГИ с пространственным шагом 5 км [3]. Система обеспечивает 3-дневный прогноз полей течений, температуры, солености и плотности в указанной области.

Разработанная региональная система прогноза динамических процессов будет служить базой для развития комплексной системы моделирования и прогноза состояния Черного моря, которая позволит в дальнейшем предска-

зывать не только изменения динамических процессов, но и, в случае необходимости, зоны распространения нефтепродуктов и других загрязняющих веществ; устанавливать местоположение источника загрязнения по известным концентрациям загрязняющих веществ в верхнем слое моря и т. д.

За последние десятилетия интенсивно происходит загрязнение отдельных регионов Мирового океана нефтепродуктами и другими высокотоксичными веществами антропогенного происхождения. В этом отношении особое место занимают внутренние водоемы, которые из-за малого водообмена с Мировым океаном особо чувствительны к антропогенным нагрузкам. Сказанное в первую очередь можно отнести к Черному морю, загрязнение которого значительно прогрессирует. Хорошо известно, что вследствие существенного антропогенного воздействия и гидрологических особенностей Черное море является одним из наиболее загрязненных бассейнов Мирового океана [14 – 17]. Для Черного моря, как и для других морей, нефть и нефтепродукты являются самыми распространенными и опасными загрязнителями. Согласно данным, приведенным в работе [14], ежегодное количество нефтяных выбросов в Черное море по 2003 г. составляло 110 000 т. В одном из документов, подготовленных Парламентской ассамблеей Совета Европы [17], в котором количественно оценен вклад больших рек в загрязнение Черного моря, отмечено, что только р. Дунай ежегодно выносит в море 50 000 т нефтепродуктов. Сегодня Черное море играет роль транспортного коридора перевозки нефтепродуктов с востока на запад, а в ближайшие годы здесь ожидается существенное увеличение нефтеперевозок. Этот факт создает значительную потенциальную угрозу еще большего заражения морской экосистемы нефтепродуктами.

Развитие методов прогноза нефтяного загрязнения является одной из актуальных задач современной прикладной океанографии [18, 19]. Надежный оперативный прогноз зон распространения и концентраций загрязняющих веществ в случае аварийных выбросов нефти в морской бассейн позволит оптимизировать эффективность проводимых мероприятий с целью доведения до минимума возможных негативных последствий, вызванных нефтяным загрязнением.

Основные механизмы изменчивости концентраций и распространения нефтяных загрязнений в морской среде достаточно детально описаны в работах [14, 20 – 22]. Кроме адвективного переноса и турбулентной диффузии, в первые дни после разлива на концентрации нефти влияют процессы испарения, эмульгирования и диспергирования. Моделированию переноса нефтяного пятна в Черном и других морях посвящено значительное количество публикаций (например, [14, 23 – 38]). Мы кратко остановимся на некоторых из них. В статье [14] разработана комплексная модель циркуляции вод и переноса нефтяных пятен в Черном море на основе метода блуждающих частиц, который позволяет следить за движением отдельных частиц, совокупность которых составляет нефтяной слик. Параметры циркуляции получены из модели *DiaCAST* [39], адаптированной для Черного моря. Модель из статьи [14] использована также для Каспийского моря [24 – 26], но поля течений и турбулентности были воспроизведены с помощью модели *POM* [40], адаптированной для Каспийского моря.

В Датском метеорологическом институте разработана усовершенствованная версия модели переноса нефтяного загрязнения [27], которая пред-

ставляет собой дополнительный модуль к оперативной модели океанической циркуляции. Турбулентное движение описывается методом Монте-Карло. Эта модель используется для Северного и Балтийского морей и дает прогноз не только распространения нефтяной пленки на поверхности моря, но и количества нефти, погруженной в нижние слои.

Метеорологической службой Франции *Météo-France* разработана трехмерная модель нефтяного загрязнения *MOTHU* [28 – 32], которая присоединена к модели океанической циркуляции. Модель *MOTHU* используется для Эгейского, Средиземного морей и других регионов Мирового океана. Национальной метеорологической службой Болгарии осуществлено адаптивное изменение этой модели для Бургасского залива [33]. В настоящее время *MOTHU* является составной частью системы оперативных морских прогнозов в Болгарии, ее можно использовать в случае аварийных ситуаций.

В работе [34] развита система моделирования погоды, морского течения и ветрового волнения, в которую включена модель переноса нефтяного пятна. Для оперативного прогноза погоды в регионе Черного моря используется модель *MM5* [41], для моделирования ветрового волнения – *WAVEWATCH III* [42], а гидродинамика Черного моря рассчитывается с помощью модели *POM* [40]. Система моделирования реализована для северо-западного шельфа Черного моря и акваторий устьев рек Днепра и Буга.

В статьях [37, 38] на основе уравнения переноса – диффузии для неконсервативной примеси моделировался процесс распространения нефти по всему Черному морю, разлитой на поверхности в большом количестве.

В настоящей статье региональная система краткосрочного прогноза состояния Черного моря для его восточной части расширена путем включения в нее модели распространения нефтяного загрязнения [37, 38]. Приведены некоторые результаты численных экспериментов по прогнозу региональной циркуляции вод и переноса нефтяного пятна для случаев разных местоположений гипотетического источника загрязнения в условиях реальных циркуляционных режимов.

Модуль переноса нефтяного пятна. После того как под влиянием гравитационных сил и сил вязкости и натяжения на морской поверхности формируется нефтяная пленка, ее дальнейшее поведение можно описать уравнением переноса – диффузии для неконсервативной примеси. Нефтяная пленка начинает мигрировать и меняет размеры и конфигурацию под влиянием гидродинамических факторов – адвекции и турбулентной диффузии. Одновременно нефть, погруженная в нижние слои моря, подвергается физическим и биохимическим трансформациям. Поскольку нашей целью является расчет прогноза распространения загрязнения на 3 сут, среди физических и биохимических факторов наиболее важным является испарение нефти, интенсивность которого зависит как от ее фракционного состава, так и от внешних условий – температуры и скорости ветра, а также площади растекания нефти. Нефть представляет собой смесь углеводородных соединений, и после ее разлива летучие компоненты с низкой точкой кипения быстро испаряются.

Следовательно, интенсивность испарения зависит от типа нефти. Согласно работе [22], в среднем в результате испарения в период времени от нескольких до 24 ч теряется от одной до двух третей массы нефтяного разлива.

В двумерной области Ω с границей S рассматривается уравнение переноса – диффузии для неконсервативной примеси, записанное в дивергентной форме

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial u \varphi}{\partial x} + \frac{\partial v \varphi}{\partial y} + \sigma \varphi = \frac{\partial}{\partial x} \mu_{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu_{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial y} + f, \quad (1)$$

со следующими граничными и начальными условиями:

$$a \left(\mu_{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial n} - \beta \varphi \right) + b Q = 0 \quad \text{на } S, \quad (2)$$

$$\varphi = \varphi^0 \quad \text{при } t = 0. \quad (3)$$

Здесь предполагается, что горизонтальные компоненты течения u и v вдоль осей x и y удовлетворяют уравнению неразрывности

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0.$$

Остальные обозначения следующие: φ – объемная концентрация субстанции; μ_{φ} – коэффициент турбулентной диффузии; n – внешняя нормаль к границе S ; $\sigma = \ln 2 / T_0$ – параметр неконсервативности, который описывает изменение концентраций из-за испарения и других факторов; T_0 представляет собой временной интервал, в течение которого начальная концентрация загрязнения уменьшается в два раза; f описывает в общем пространственно-временное распределение мощности источника Q , которое в конкретном случае точечного источника можно представить с помощью δ -функции:

$$f = Q \delta(x - x_0) \delta(y - y_0),$$

здесь x_0 и y_0 – координаты источника. В граничном условии (2) a и b – коэффициенты, принимающие значения 1 или 0; β – параметр, который характеризует взаимодействие загрязняющего вещества с границей. Коэффициент диффузии рассчитывался по формуле [43]

$$\mu_{\varphi} = \gamma \Delta x \Delta y \sqrt{2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2},$$

где Δx и Δy – горизонтальные шаги сетки, а γ – некоторая константа.

Задача (1) – (3) решалась численно с помощью двуциклического метода расщепления по координатам x и y , а для аппроксимации по времени применялась схема Кранка – Николсона [44].

Гидродинамический модуль. Нестационарное поле течения, необходимое для расчета прогноза нефтяного загрязнения, получается по модели РМ-ИГ, которая является основным компонентом региональной прогностической системы. Все входные данные, необходимые для расчета полей течений и термохалинных полей, берутся из модели МГИ через интернет в оперативном режиме [7 – 10]. Входными параметрами являются: трехмерные начальные поля компонент скорости течения, температуры и солёности; двумерные поля этих же величин на жидкой границе; двумерные метеорологические поля потоков тепла, атмосферных осадков, испарения и тангенциального напряжения трения ветра на поверхности моря. Поля на жидкой границе представляют собой прогностические значения, полученные по модели динамики Черного моря МГИ, а метеорологические поля – прогностические значения, рассчитанные по региональной модели динамики атмосферы *ALADIN*.

В основе модели РМ-ИГ лежит полная система уравнений гидротермодинамики, записанная в прямоугольной декартовой системе координат. Система уравнений решается двуциклическим методом расщепления по физическим процессам, вертикальным координатным плоскостям и линиям [45 – 47]. В модели учитываются основные факторы: 1) ветровое воздействие и потоки тепла и солей; 2) рельеф дна и конфигурация морского бассейна; 3) поглощение коротковолновой радиации верхним слоем моря; 4) пространственно-временное изменение коэффициентов вязкости и диффузии; 5) речной сток рек Грузии.

Входные параметры. Модель распространения нефтяного загрязнения включена в региональную прогностическую систему как отдельный модуль, с помощью которого в случае аварийных ситуаций можно рассчитать с 3-дневной заблаговременностью прогноз концентраций нефти и зон распространения загрязнения в восточной части Черного моря с разрешающей способностью 1 км. С этой целью в модели вводятся координаты местоположения источника загрязнения, количество разлитой на поверхности моря нефти и продолжительность разлива. Поля течений рассчитываются с помощью модели РМ-ИГ.

В моделях динамики и нефтяного загрязнения используется сетка, имеющая 215×347 точек по горизонтали. В модели динамики по вертикали берутся 32 расчетных уровня с неравномерными вертикальными шагами (минимальный шаг – 2 м у поверхности, максимальный – 100 м в глубинных слоях ниже 200 м). Временной шаг в обеих моделях – 0,5 ч. В конкретных численных экспериментах по моделированию распространения нефти задавали: $a = 1$, $b = 0$, $\beta = 0$, $\gamma = 0,1$.

С учетом того факта, что испарение существенно в 1-е сут после разлива, принимали, что параметр неконсервативности $\sigma = 1,6 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ при $t \leq 12$ ч, что соответствует потере 50% массы нефти за 1/2 сут. Для $t > 12$ ч было принято $\sigma = 2,3 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$. Поскольку основной целью исследований, представленных в данной статье, является изучение влияния динамических факторов на процесс распространения нефтяного пятна, принятые значения параметра неконсервативности характеризуют в среднем скорость распада и не относятся к конкретному типу нефти.

Моделирование и прогноз региональных динамических процессов в восточной части Черного моря. Сопоставление результатов прогноза гидрофизических полей, выполненного по нашей региональной системе, с данными наблюдений, в том числе со спутниковыми, а также с результатами модели МГИ показало, что региональная система хорошо воспроизводит реальные динамические процессы в восточной части моря [2, 7]. Кроме того, стало ясно, что высокая разрешающая способность численной модели является существенным фактором для идентификации субмезомасштабных прибрежных вихревых образований с диаметром около 5 – 12 км, которые, согласно нашим расчетам, нередко формируются в узкой зоне вдоль Кавказского побережья [7 – 10]. Следует отметить, что о существовании таких прибрежных вихрей у Кавказского побережья свидетельствуют гидрологические исследования, проведенные в 2007 – 2008 гг. в районе Геленджика [48]. Субмезомасштабные вихри идентифицируются и в других прибрежных районах Черного моря [49, 50].

В статье [51] построена схема поверхностной циркуляции Черного моря на основе гидрографических исследований, проведенных до 1990 г., а в работе [52] эта схема была немного видоизменена путем добавления некоторых прибрежных вихрей. На обеих схемах показаны основные черты общей циркуляции вод Черного моря, включая прибрежные мезомасштабные вихревые образования. В [51] циркуляция в моделируемой нами восточной части бассейна представлена только Батумским антициклоническим вихрем (БАВ), а в [52] добавлен вихрь сравнительно малого масштаба, сформировавшийся в акватории вблизи г. Сухум (Сухумский вихрь). Накопленные нами за последние 3 – 4 года результаты расчетов циркуляции и термohалинных полей показывают, что крайне восточная часть Черного моря представляет собой динамически активный регион, где, кроме БАВ и Сухумского вихря, в течение года непрерывно образуются циклонические и антициклонические вихревые образования различных масштабов [10, 11].

С целью иллюстрации на рис. 1 представлены некоторые результаты расчетов эволюции поверхностной циркуляции на основе региональной системы прогноза. Чтобы не перегружать статью рисунками, здесь приведены некоторые рассчитанные поля лишь за 2012 – 2014 гг., которые, на наш взгляд, дают определенное представление о межгодовой и внутригодовой изменчивости динамических процессов в рассматриваемом регионе Черного моря. Общей закономерностью является то, что динамическая структура верхнего слоя моря в определенной степени различна в теплый (апрель – октябрь) и холодный (ноябрь – март) сезоны года. Так, например, приблизительно с марта в юго-западной части рассматриваемой восточной акватории начинает зарождаться БАВ, который в дальнейшем может стать более интенсивным и занимать значительную территорию в этой части моря (рис. 1, *а, б, в*). БАВ существует почти в течение всего теплого периода года, характеризуется меняющейся интенсивностью и в большинстве случаев является главным элементом региональной циркуляции. Этот вихрь довольно устойчив и по вертикали охватывает 300 – 400 м. В разные годы БАВ достигает максимума своей интенсивности в разные месяцы. Например, в 2012 г. БАВ достигал максимальных размеров (с диаметром примерно 160 – 180 км) в октябре (см. рис. 1, *б*), тогда как в 2010 и 2011 гг. – летом.

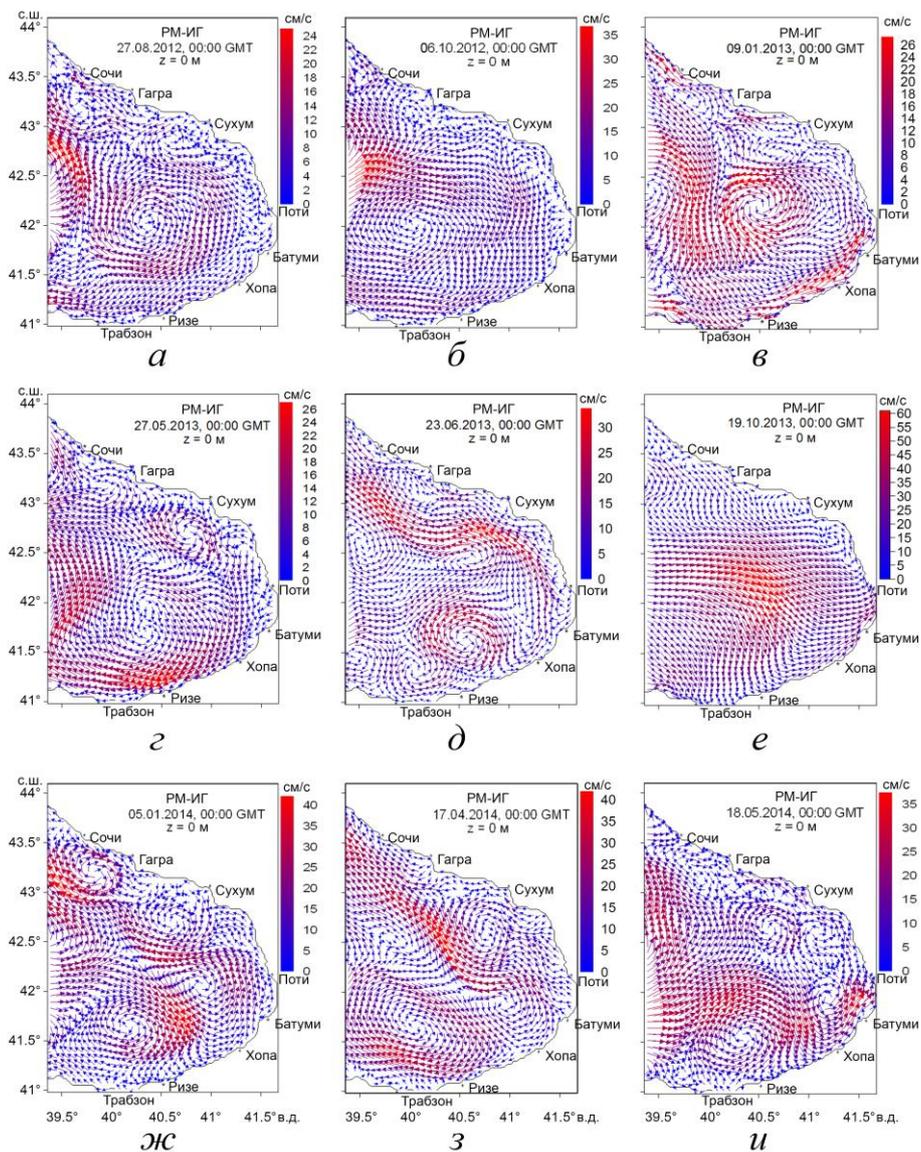


Рис. 1. Прогностические поля поверхностных течений в восточной части Черного моря в 2012 – 2014 гг.: *а* – 27 августа 2012 г., *б* – 6 октября 2012 г., *в* – 9 января 2013 г., *з* – 27 мая 2013 г., *д* – 23 июня 2013 г., *е* – 19 октября 2013 г., *ж* – 5 января 2014 г., *з* – 17 апреля 2014 г., *и* – 18 мая 2014 г.

В стадии максимального развития в БАВ формируется специфический режим солёности: солёность вод значительно уменьшается в центральной части вихря, а его периферийное течение способствует проникновению более солёных вод из открытой части моря в крайне восточную часть [7]. В сентябре – ноябре БАВ постепенно ослабевает и трансформируется в течение с несколькими завихренностями. В холодный период года практически не существует доминирующего вихревого образования (рис. 1, *в*, *ж*) и циркуляция характеризуется несколькими циклоническими и антициклоническими вихрями в сред-

нем диаметром 40 – 60 км. Следует отметить антициклонический вихрь, который нередко формируется в акватории около г. Сухум (см. рис. 1, *ж – и*). Этот вихрь может наблюдаться в любом месяце, но чаще всего он образуется в теплый период. Сильные ветры оказывают сглаживающее действие на поверхностное морское течение и способствуют исчезновению вихревых образований (см. рис. 1, *е*). Под влиянием таких ветров скорости морского течения возрастают в среднем до 60 – 70 см/с, а в некоторых случаях могут достигать 100 см/с.

Моделирование и прогноз переноса нефтяного пятна. Численные эксперименты проводились с целью выяснения влияния циркуляционного режима и местоположения точки разлива на характер переноса нефтяного пятна. В этих экспериментах, приведенных в статье, аварийный выброс нефти в количестве 50 т происходил в течение 2 ч. Учитывая, что предельно допустимой концентрацией нефтяного загрязнения обычно считается значение 0,05 мг/л, во всех численных экспериментах мы принимали равными нулю концентрации меньше 0,001 мг/л.

На рис. 2 представлены результаты расчетов прогноза течения и переноса нефтяной пленки на поверхности Черного моря 25 – 28 сентября 2011 г. (00:00 GMT). В первом численном эксперименте (рис. 2, *а – з*) точка разлива нефти с координатами 157 Δх и 142 Δу находилась в области антициклонического вихря ближе к его центру примерно в 45 км от г. Поти. Во втором численном эксперименте (рис. 2, *д – з*) точка разлива была смещена на 20 км к берегам Грузии и ее координаты были 177 Δх и 142 Δу. За рассматриваемый прогностический интервал сформировался специфический динамический режим: в большей части акватории образовались два антициклонических вихря с диаметрами примерно 60 – 70 км и центрами в юго-западной части и примерно в середине восточной части этой акватории. Кроме того, вдоль Кавказского и Турецкого побережий образовалась узкая зона, где наблюдался существенный нестационарный процесс генерирования и диссипации субмезомасштабных неустойчивых вдольбереговых вихрей. Под влиянием антициклонической вихревой структуры в обоих случаях перемещение нефтяного пятна происходит в целом в южном направлении (рис. 2). Одновременно пятно расширяется под влиянием процессов диффузии, а концентрации нефти постепенно уменьшаются из-за расширения пятен и физико-химических факторов, учитывающихся в модели заданием параметра неконсервативности. Из рис. 2, *д – з* хорошо видно, что нефтяное пятно, постепенно растягиваясь по широте при перемещении, принимает подковообразную форму. Анализ рисунка позволяет заключить, что значительная неоднородность поля скорости в части акватории, покрытой нефтяным пятном, заметно сказывается на характере деформации этого пятна.

При данном режиме циркуляции вод и местоположении аварийных разливов, рассмотренных в этих численных экспериментах, нефтяное пятно приближается к берегу на некоторое расстояние. Но водам непосредственно у берегов Грузии не грозит опасность загрязнения, поскольку антициклонический вихрь, который в течение рассмотренного прогностического интервала времени претерпевает значительную нестационарную перестройку, находит-

ся на определенном расстоянии от берега. По-видимому, процессы образования субмезомасштабных неустойчивых вихревых структур в узкой береговой зоне препятствуют приближению восточной ветви этого вихря ближе к берегам Грузии и соответственно загрязнению нефтью береговых вод.

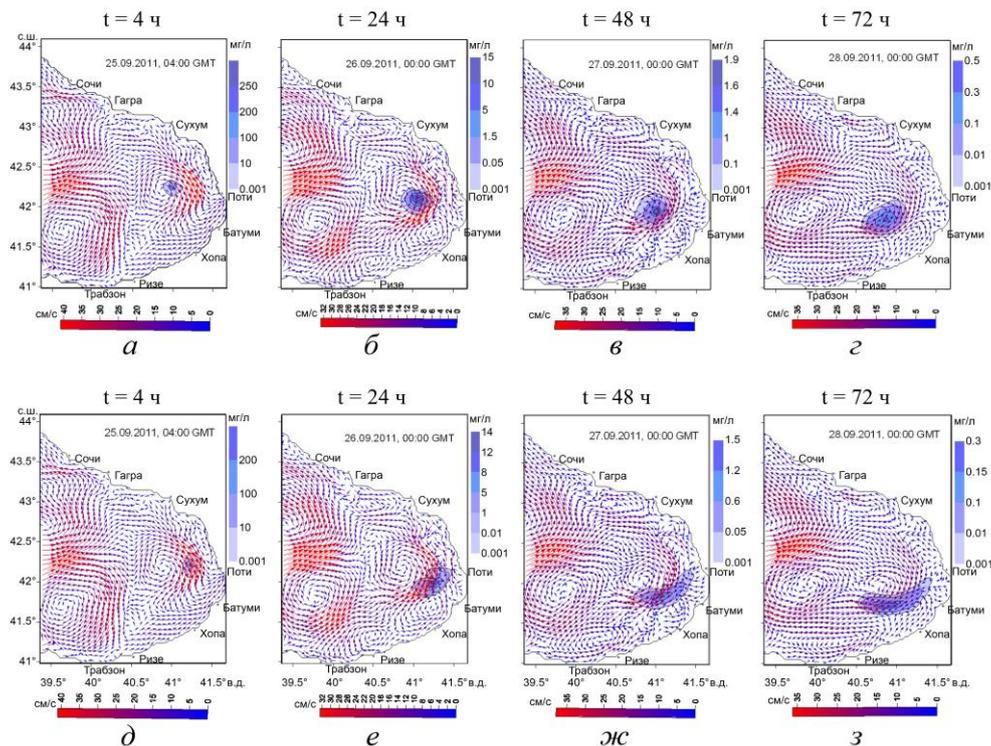


Рис. 2. Рассчитанные поверхностные течения и моделируемое нефтяное пятно в указанные моменты времени после гипотетического аварийного разлива в точках с координатами 157 Δx , 142 Δy (а, б, в, г) и с координатами 177 Δx , 142 Δy (д, е, ж, з) (прогностический интервал 25 – 28 сентября 2011 г., 00:00 GMT)

В другом численном эксперименте местоположение точки разлива нефти было то же самое, что и во втором численном эксперименте (177 Δx , 142 Δy), но динамическая структура была иная, соответствующая прогностическому интервалу 2 – 5 января 2014 г. (00:00 GMT). На рис. 3 представлено рассчитанное поверхностное течение и нефтяное загрязнение в разные моменты после аварийного разлива. Из этого рисунка хорошо видно, что в данном случае поведение нефтяного пятна соответствует характеру циркуляции и нефтяное загрязнение удаляется от берегов Грузии.

Дополнительные численные эксперименты показали, что когда разлив происходит в центре какой-нибудь вихревой структуры, нефтяное загрязнение захватывается этим вихрем и перемещение центра нефтяного пятна не наблюдается, пятно под воздействием процессов диффузии расширяется, а концентрации уменьшаются.

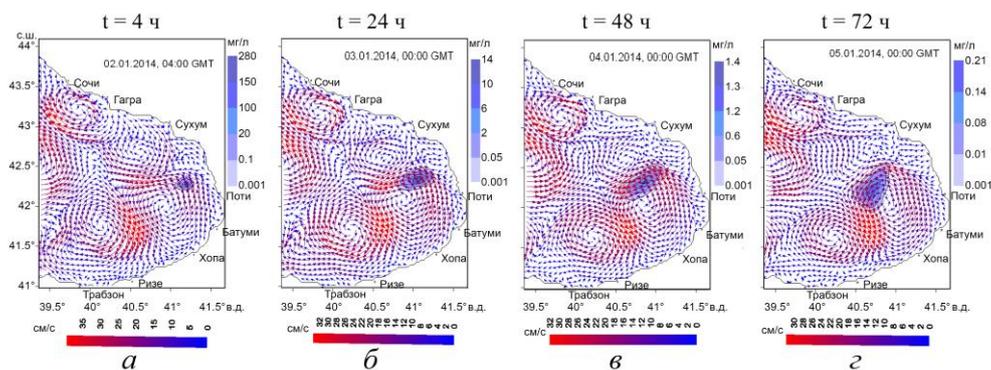


Рис. 3. Рассчитанные поверхностные течения и моделируемое нефтяное пятно в указанные моменты времени после гипотетического аварийного разлива в точке с координатами 177 Дх и 142 Ду (а, б, в, г) (прогностический интервал 2 – 5 января 2014 г., 00:00 GMT)

Заключение. Представленная региональная система краткосрочного прогноза состояния Черного моря позволяет наряду с прогнозом циркуляции вод и термохалинных полей в случае аварийного разлива нефти прогнозировать также распространение нефтяного загрязнения в восточной части Черного моря с пространственным разрешением 1 км. Наш подход к воспроизведению переноса нефтяной пленки на морской поверхности основывается на решении двумерного уравнения переноса – диффузии для неконсервативной примеси с использованием реального нестационарного поля течений, рассчитанного в гидродинамическом блоке региональной системы. При этом учитывается явно пространственно-временное изменение поля турбулентности, а уменьшение концентраций нефти из-за испарения и других физико-химических факторов учитывается косвенно с помощью соответствующего задания параметра неконсервативности.

Анализ результатов расчета прогноза гидрофизических процессов позволяет заключить, что динамические процессы, развивающиеся в рассмотренной части морского бассейна, характеризуются значительной внутригодовой и межгодовой изменчивостью, выражающейся в непрерывном зарождении и эволюции циклонических и антициклонических вихревых образований различных масштабов, начиная с субмезомасштабных вдольбереговых вихрей диаметром примерно 5 км до вихрей диаметром порядка 100 км.

Численные эксперименты по моделированию распространения нефтяного загрязнения показали, что режим циркуляции вод и местоположение точки разлива во многом определяют характер переноса нефтяного пятна.

Дальнейшее усовершенствование модели переноса нефтяного пятна связано с явным учетом некоторых физико-химических факторов, в том числе с обобщением модели на трехмерный случай, что позволит учитывать процессы седиментации и дисперсии по вертикали.

Представленные в данной статье исследования выполнены в рамках гранта национального научного фонда им. Шота Руставели (контракт № 30/07).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Korotaev G.K., Cordoneanu E., Dorofeyev V.L. et al.* Near-operational Black Sea nowcasting / forecasting system // European Operational Oceanography: Present and Future. – 4th EuroGOOS Conference, 6 – 9 June 2005, Brest. – France, 2006. – P. 269 – 275.
2. *Kubryakov A.I., Grigoriev A.V., Kordzadze A.A. et al.* Nowcasting / forecasting subsystem of the circulation in the Black Sea nearshore regions // Ibid. – P. 605 – 610.
3. *Korotaev G.K., Oguz T., Dorofeyev V.L. et al.* Development of Black Sea nowcasting and forecasting system // Ocean Sci. – 2011. – 7. – P. 629 – 649. – doi:10.5194/os-7-629-2011. – www.ocean-sci.net/7/629/2011/.
4. *Kubryakov A.I., Korotaev G.K., Dorofeev V.L. et al.* Black Sea Coastal forecasting systems // Ibid. – 2012. – 8. – P. 183 – 196. – doi:10.5194/os-8-183-2012. – www.ocean-sci.net/8/183/2012/.
5. *Григорьев А.В., Зацепин А.Г.* Верификация численной модели динамики вод российской зоны Черного моря по данным дистанционных и контактных наблюдений // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. – Вып. 25. – Т. 2. – С. 147 – 160.
6. *Grigoriev A.V., Zatsepin A.G.* Numerical modeling of water dynamics of Russian zone of the Black Sea within the framework of operational oceanography tasks // J. Georgian Geophys. Soc. – Tbilisi, 2013. – 16b. – P. 138 – 157.
7. *Kordzadze A.A., Demetrasvili D.I.* Operational forecast of hydrophysical fields in the Georgian Black Sea coastal zone within the ECOOP // Ocean Sci. – 2011. – 7. – P. 793 – 803. – doi:10.5194/os-7-793-2011. – www.ocean-sci.net/7/793/2011/.
8. *Кордзадзе А.А., Деметрашвили Д.И.* Региональная оперативная система прогноза состояния восточной части Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. – Вып. 25. – Т. 2. – С. 136 – 147.
9. *Kordzadze A.A., Demetrasvili D.I.* Coastal forecasting system for the easternmost part of the Black Sea // Turk. J. Fisher. Aqua. Sci. – 2012. – 12. – P. 471 – 477. – doi:10.4194/1303-2712-v12_2_38. – www.trjfas.org.
10. *Кордзадзе А.А., Деметрашвили Д.И.* Краткосрочный прогноз гидрофизических полей в восточной части Черного моря // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 2013. – 49, № 6. – С. 733 – 745.
11. *Kordzadze A.A., Demetrasvili D.I., Surmava A.A.* Dynamical processes developed in the easternmost part of the Black Sea in warm period for 2010 – 2013 // J. Georgian Geophys. Soc. – Tbilisi, 2013. – 16b. – P. 3 – 12.
12. *Кордзадзе А.А., Деметрашвили Д.И., Сурмава А.А.* О реакции гидрологического режима Черного моря на изменчивость атмосферных процессов // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2004. – Вып. 10. – С. 265 – 277.
13. *Кордзадзе А.А., Деметрашвили Д.И., Сурмава А.А.* Численное моделирование гидрофизических полей Черного моря в условиях чередования атмосферных циркуляционных процессов // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 2008. – 44, № 2. – С. 227 – 238.
14. *Коротенко К.А., Дитрих Д.Е., Боуман Дж.* Моделирование циркуляции и перенос нефтяных пятен в Черном море // Океанология. – 2003. – 43, № 3. – С. 367 – 378.
15. *Коротаев Г.К., Еремеев В.Н.* Введение в оперативную океанографию Черного моря. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. – 382 с.
16. *Губанов Е.П., Иевлева М.Н.* Нефтяное загрязнение Черного моря и его влияние на экосистему. – 2006. – 16 с. – <http://www.ceemar.org/dspace/bitstream/11099/1132/1/article-13.pdf>.
17. *Mironescu L.* The fight against harm to the environment in the Black Sea // Parliamentary Assembly Recommendation 1837, Doc.11632. – 2008.

18. *Лебедев С.А.* Оценка фонового загрязнения нефтепродуктами Черного и Каспийского морей с использованием данных дистанционного зондирования и модельных расчетов. – 2009. – 21 с. – http://www.mkgtu.ru/docs/KONF_SEM/lebedev.pdf.
19. *Oil spill accident in the Kerch Strait in November 2007 // Commission on the Protection of the Black Sea Against Pollution / Eds. A. Korshenko, Y. Ilyin, V. Velikova.* – М.: Nauka, 2011. – 284 p.
20. *Журбас В.М.* Основные механизмы распространения нефти в море // *Механика жидкости и газа.* – М.: ВИНТИ, 1978. – Т. 12. – С. 144 – 159.
21. *Химия океана. Т.1 / Под ред. О.К. Бордовского и Б.Н. Иваненкова.* – М.: Наука, 1979. – 518 с.
22. *Врагов А.В.* Методы обнаружения, оценки и ликвидации аварийных разливов нефти. – Новосибирский госуниверситет, 2002. – 224 с.
23. *Озмидов Р.В.* Диффузия примесей в океане. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 280 с.
24. *Korotenko K.A., Mamedov R.M., Mooers C.N.K.* Prediction of the dispersal of oil transport in the Caspian Sea resulting from a continuous release // *Spill Sci. Technol. Bull.* – 2001. – 6, № 5/6. – P. 323 – 339.
25. *Korotenko K.A., Mamedov R.M.* Modeling of oil slick transport processes in coastal zone of the Caspian Sea // *Oceanol.* – 2001. – 41. – P. 37 – 48.
26. *Korotenko K.A., Mamedov R.M., Mooers C.N.K.* Prediction of the transport and dispersal of oil in the south Caspian Sea resulting from blowouts // *Environ. Fluid Mech.* – 2001. – 1, № 4. – P. 383 – 414.
27. *Christiansen Bettina M.* 3D oil drift and fate forecast at DMI // *Techn. Rep. № 03-36.* – Denmark, Danish Meteorological Institute. – 2003.
28. *Daniel P.* Numerical simulation of the Aegean Sea oil spill // *Proc. of the 1995 Intern. Oil Spill Conference.* American Petroleum Institute. – Washington, D. C., 1995. – P. 894 – 896. – <http://www.meteorologie.eu.org/mohty/references/iosc1995.pdf>.
29. *Daniel P.* Forecasting oil spill drift at Meteo-France // *Proc. of the 1997 Intern. Oil Spill Conference.* American Petroleum Institute. – Washington, D. C., 1997. – P. 990 – 993.
30. *Daniel P., Kortchev G., Mungov G.* Forecasting oil spill drift in the Black Sea // *Proc. of oil spills in the Mediterranean and Black Sea regions // MEDOSC, University of Manchester, UK, 1998.* – P. D01 1 – 8.
31. *Daniel P., Poitevin J., Tiercelin C. et al.* Forecasting accidental marine pollution drift: the French operational plan, oil and hydrocarbon spills, modelling, analysis, and control // *Computational Mechanics Publications.* – WTT Press, 1998. – P. 43 – 52.
32. *Daniel P., Gilbert T., Hackett B. et al.* Operational metocean products and services in support of marine pollution emergency response operations // *Proc. of the 2008 Intern. Oil Spill Conference.* American Petroleum Institute. – Washington, D. C. – 2008.
33. *Galabov V.* Oil spill drift operational forecasts for Bulgarian coastal area and numerical study of potential oil pollution in the bay of Burgas // *Abstracts 2011 3rd Bi-annual BS Scientific Conference and UP-GRADE BS-SCENE Project joint Conference.* – Ukraine, Odessa. – 2011.
34. *Brovchenko I., Kuschan A., Maderich V. et al.* The modeling system for simulation of the oil spills in the Black Sea // *Proc. 2002, 3rd EuroGOOS Conference.* – Greece, Athens, 2002.
35. *Reed M., Johansen O., Brandvik P.J. et al.* Oil spill modelling toward the close of the 20th century: overview of the state of the art // *Spill Sci. Technol. Bull.* – 1999. – 5, № 1. – P. 3 – 16.
36. *Shou-Dong Wang, Yong-Ming Shen, Ya-Kun Guo et al.* Three-dimensional numerical simulation for transport of oil spills in seas // *Ocean Engineer.* – 2008. – 35. – P. 503 – 510.
37. *Kordzadze A., Demetrashvili D.* Numerical modeling of distribution of the oil pollution in the Black Sea // *J. Georgian Geophys. Soc.* – 2000. – 5b. – P. 12 – 20.
38. *Kordzadze A., Demetrashvili D., Surmava A.A.* A numerical study of spreading of the oil pollution in the natural environment // *Экология окружающей среды и безопасность жизнедеятельности.* – Киев, 2005. – № 2. – С. 77 – 84.

39. *Dietrich D.E., Lin C.A., Mestas-Nunez A. et al.* A high resolution numerical study of Gulf of Mexico fronts and eddies // *Meteorol. Atmos. Phys.* – 1997. – 64. – P. 187 – 201.
40. *Blumberg A.F., Mellor G.L.* A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model // *Three-Dimens. Coastal Ocean Models.* – Amer. Geophys. Union, Washington, D. C. – 1987. – 4. – P. 1 – 16.
41. *Grell G., Dudhia A.J., Stauffer D.R.* A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5) // *NCAR Technical Note. NCAR/TN-398+STR.* – 1994.
42. *Tolman H.L.* User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 1.18 // *NOAA/NWS/NCEP/OMB Technical Note 166.* – 1999.
43. *Зилитинкевич С.С., Монин А.С.* Турбулентность в динамических моделях атмосферы. – Л.: Наука, 1971. – 44 с.
44. *Марчук Г.И.* Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. – М.: Наука, 1982. – 319 с.
45. *Марчук Г.И.* Численные методы в прогнозе погоды. – Л.: Гидрометеоздат, 1967. – 356 с.
46. *Марчук Г.И.* Численное решение задач динамики атмосферы и океана. – Л.: Гидрометеоздат, 1974. – 303 с.
47. *Кордзадзе А.А.* Математическое моделирование динамики морских течений (теория, алгоритмы, численные эксперименты). – М.: ОВМ АН СССР, 1989. – 218 с.
48. *Zatsepin A.G., Baranov V.I., Kondrashov A.A. et al.* Submesoscale eddies at the Caucasus Black Sea shelf and the mechanisms of their generation // *Oceanol.* – 2011. – 51, № 4. – P. 554 – 567.
49. *Иванов В.А., Тучковенко Ю.С.* Прикладное математическое моделирование качества вод шельфовых морских экосистем. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2006. – 368 с.
50. *Демьшев С.Г.* Численный прогностический расчет течений в Черном море с высоким горизонтальным разрешением // *Морской гидрофизический журнал.* – 2011. – № 1. – С. 36 – 47.
51. *Oguz T., Latun V.S., Latif M.A. et al.* Circulation in the surface and intermediate layers in the Black Sea // *Deep-Sea Res.* – 1993. – 1, № 40. – P. 1597 – 1612.
52. *Korotaev G., Oguz T., Nikiforov A. et al.* Seasonal, interannual, and mesoscale variability of the Black Sea upper layer circulation derived from altimeter data // *J. Geophys. Res.* – 2003. – 108, № C4. – 3122. – doi:10.1029/2002JC001508.

Forecast of circulation processes and propagation of oil pollution in the eastern Black Sea based on the regional complex model

A.A. Kordzadze, D.I. Demetrashvili

*Nodia Institute of Geophysics
of the Dzhavakhishvili Tbilisi State University, Tbilisi, Georgia
e-mail: akordzadze@yahoo.com*

Regional system for short-term forecasting dynamic state of the eastern Black Sea (the liquid boundary is along 39.08° E) is expanded by including the model of oil pollution spreading. The model is based on solution of a two-dimensional transfer-diffusion equation for non-conservative impurity. Alongside with a forecast of currents', temperature and salinity fields, the proposed system, if necessary, permits to forecast oil pollution spread for 3 days with spatial resolution 1 km. The numerical experiments performed for the cases of various locations of a hypothetic pollution source occurring under actual circulation modes, show a significant role of dynamic processes in formation of some features of spatial-temporal pollution distribution.

Keywords: current field, numerical model, splitting method, diffusion, oil patch.