

УДК 551.465

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИРКУЛЯЦИИ И ПЕРЕНОСА НЕФТЯНЫХ ПЯТЕН В ЧЕРНОМ МОРЕ

© 2003 г. К. А. Коротенко¹, Д. Е. Дитрих², М. Дж. Боуман³¹Институт океанологии им. П.П. Шишова РАН, Москва, Россия²Университет штата Нью-Мексико, США³Центр морских исследований университета штата Нью-Йорк, США

Поступила в редакцию 29.01.2002 г., после доработки 27.01.2003 г.

Представлена трехмерная комплексная модель для расчета циркуляции и переноса трассеров в Черном море. Гидродинамический блок построен на основе высокоразрешающей слабо диссипативной модели DieCAST, адаптированной для Черного моря. Блок переноса пятен нефти построен на основе метода блуждающих частиц, позволяющего предсказывать движения индивидуальных частиц, совокупность которых представляет нефтяное пятно. Численные эксперименты показали возможность с большой точностью воспроизводить основные черты динамики Черного моря, включая генезис прибрежных антициклонических вихрей, и прогнозировать распространение нефтяных загрязнений в море.

ВВЕДЕНИЕ

Открытие новых и эксплуатация старых месторождений нефти активизировало поиски путей эффективной и безопасной ее транспортировки. В море, наряду с традиционным способом – перевозкой нефти и нефтепродуктов с помощью танкеров – в последние годы весьма интенсивно разрабатываются проекты прокладки трубопроводов по дну моря, что удешевит, и, как кажется, обезопасит сам процесс транспортировки нефти. Однако как первый способ, так и второй, не исключают аварийные ситуации, при которых весьма вероятны разливы нефти и загрязнение обширных акваторий моря. При этом весьма вероятны также аварии на терминалах, где происходит заправка судов нефтью. Пример недавнего разлива нефти, случившегося у г. Новороссийска, показан на рис. 1. В ноябре 1999 г., в результате повреждения трубопровода 39 т сырой нефти попали в море. Этот случай не является единичным. Данные показывают, что ежегодное количество нефтяных выбросов в Черное море – порядка 110 000 т. В таблице, взятой из работы [42], представлены различные источники загрязнения нефтью и вклад в это загрязнение каждой из черноморских стран. Поскольку Черное море является полузамкнутым бассейном, оно очень чувствительно к такому виду аварий. В этой связи на первый план выходят вопросы эффективного и точного прогноза загрязнения моря и оперативной выработки предложений по ликвидации его последствий.

Распространение нефтяных пятен в море – весьма сложный процесс, зависящий от большого числа факторов, определяющих как состояние окружающей среды, так и свойства самого веще-

ства. Поэтому при постановке задачи о переносе нефтяного загрязнения в море необходимо в точности воспроизводить циркуляцию и процессы обмена в море и адекватно учитывать физико-химические свойства самой нефти и характер источников загрязнения.

1. Основные черты мезомасштабной циркуляции Черного моря. Гидрофизические наблюдения последних лет [7–12, 14, 28], численное моделирование [37, 38, 40, 41] и спутниковые данные [1–4, 23, 24, 43], позволили выявить существенные детали циркуляции Черного моря.

На рис. 2 схематично представлены детали циркуляции Черного моря, синтезированные по всем сезонам. В целом она циклоническая и определяется Основным Черноморским течением (ОЧТ),

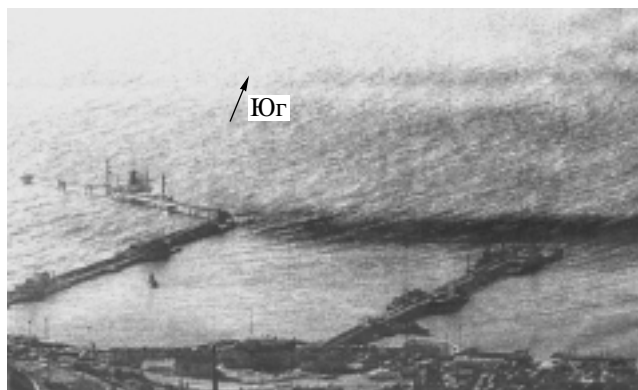


Рис. 1. Аварийный разлив нефти при разрушении терминала у г. Новороссийска. Фотография из газеты “Новороссийский рабочий” от 19.11.1999 г. (копия любезно предоставлена Т.Т. Кулинич).

Поступление нефтяных загрязнений в Черное море (тонн/год) [42]

Источники загрязнения	Болгария	Грузия	Румыния	Россия	Турция	Украина	Общее количество
Бытовые	5649.00		3144.10		7.30	21215.90	30016.30
Промышленные	2.72	78.00	4052.50	52.78	752.86	10441.00	45379.86
Суша				4200.00		5169.20	9369.20
Реки	1000.00			165.00		1473.00	2638.70
Общее количество	6651.72	78.00	7196.60	4418.48	760.16	38299.10	57404.06

которое усиливается и стабилизируется в осенне-зимний период под воздействием интенсивной атмосферной циркуляции. Главной особенностью этой циркуляции является также существование двух или трех циклонических круговоротов в западной и восточной глубоководных частях моря.

Особенности течений в отдельных районах связаны, как правило, с меандрированием ОЧТ и образованием вихрей на его периферии. Из-за взаимодействия с особенностями донного рельефа на материковом склоне и гидродинамической неустойчивости ОЧТ довольно нестабильно, что проявляется в его меандрировании. Интенсивность и период осцилляций зависит от сезона. При этом большая интенсивность меандрирования ОЧТ наблюдается в теплое время года: с апреля по ноябрь. Это связано с ослаблением интенсивности атмосферной циркуляции и преоблада-

нием в этот сезон безветренной погоды над бассейном Черного моря. Во все сезоны наблюдается появление между берегом и ОЧТ, практически по всему периметру моря прибрежных антициклонических вихрей (ПАВ). Наиболее интенсивная генерация этих вихрей, однако, происходит в теплый сезон. Наиболее характерные из ПАВ – Севастопольский, Крымский, Батумский, а также антициклоны у пролива Босфор, в районе мысов Синоп и Калиакра (рис. 2). У крупных меандров и вихрей характерные размеры достигает величин порядка 120 км вдоль западного и южного побережья, и – 250 км вдоль северного побережья [28, 39]. Относительно малые уединенные ПАВ имеют размеры порядка 20–60 км в диаметре. Эти вихри играют особую роль в вентиляции прибрежных вод, что детально обсуждается в работах [9, 10, 11]. Слева от ОЧТ его меандры могут порождать цик-

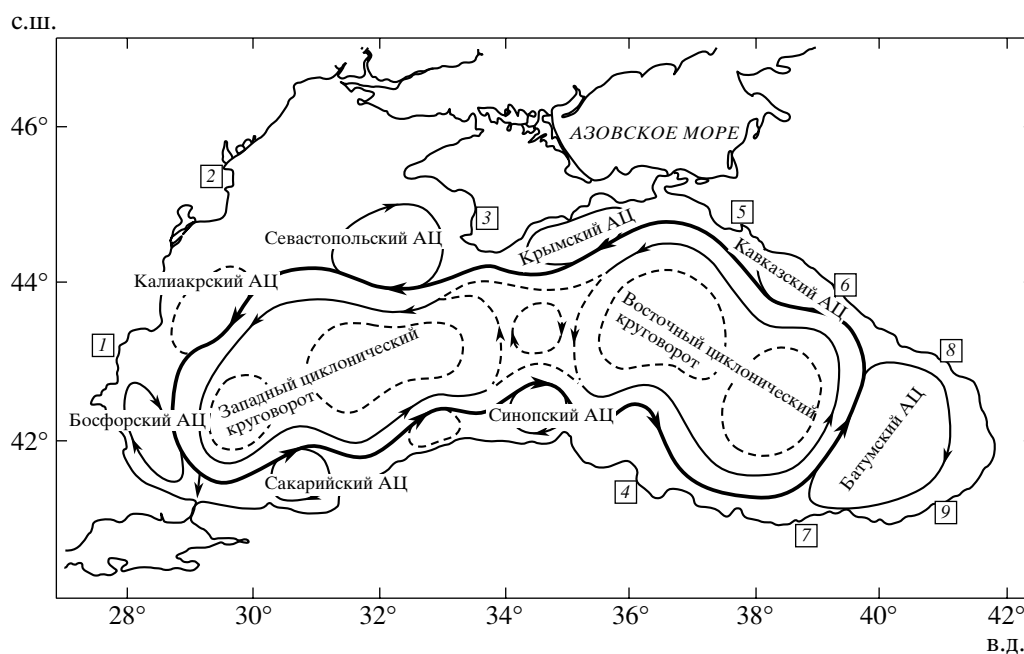


Рис. 2. Обобщенная схема циркуляции Черного моря (по [28]).

1 – р. Варна; 2 – р. Дунай; 3 – Севастополь; 4 – Самсун; 5 – Новороссийск; 6 – Сочи; 7 – Трабзон; 8 – Сухуми; 9 – Батуми.

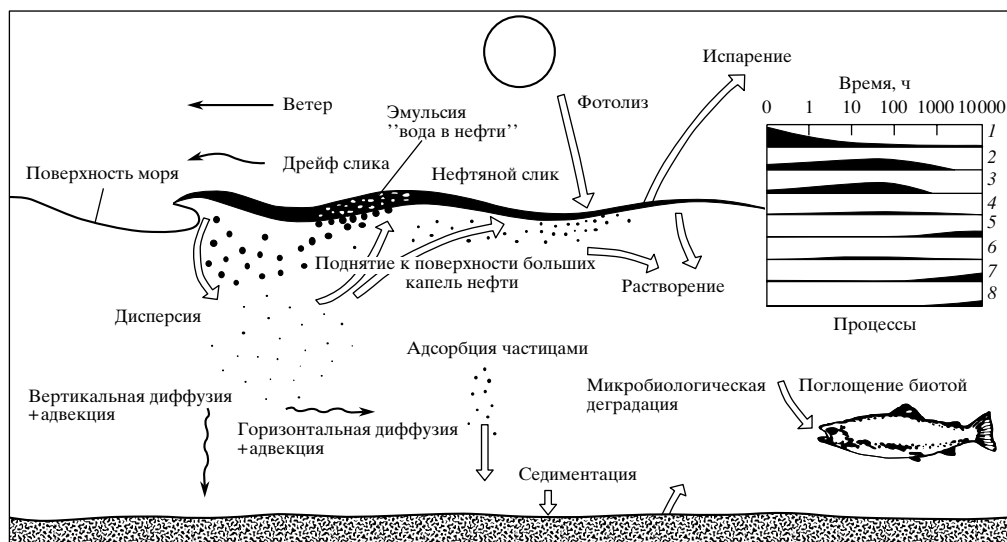


Рис. 3. Процессы, управляющие переносом и деградацией нефтяного пятна и характерное время протекания этих процессов (на врезке).

1 – испарение; 2 – диспергирование; 3 – эмульгирование; 4 – фотоокисление; 5 – биodeградация; 6 – растворение; 7 – осаждение; 8 – образование сгустков нефти.

лонические вихри, которые часто в значительной степени усложняют картину циркуляции открытой части моря.

Широкий спектр мезомасштабных динамических процессов в Черном море представляет особую трудность для их воспроизведения численными моделями. Современные модели (такие, например, как POM [15], GHER [27] и MOM [29]) с использованием сильнодиссипативных численных схем (коэффициенты горизонтального обмена определяются по формуле Смагоринского) и 2-ого порядка аппроксимации не подходят для этого, т.к. сглаживают мелкомасштабные вихри. Поэтому для моделирования динамики и процессов переноса примесей в Черном море была выбрана слабодиссипативная модель циркуляции океана DieCAST, разработанная Дитрихом [19], имеющая 4-й порядок аппроксимации [33, 34] и адаптированная авторами для Черного моря.

1.1. Особенности процессов переноса нефти в море. Как только нефть попадает на морскую поверхность, многие процессы как физические, так и физико-химические начинают воздействовать на нее, способствуя начальному формированию слика или пятна нефти под действием гравитационных сил, его переносу и деградации. К основным физико- и биохимическим процессам относятся адвективный и турбулентный перенос, испарение нефти, диспергирование, эмульгирование, фотоокисление, биodeградация, растворение, осаждение на дно и образование шариков смолы. Схематично эти процессы показаны на рис. 3. На врезке этого рисунка даны временные периоды, когда эти процессы доминируют и их следует учитывать при

моделировании. Идеи рис. 3 взяты из работ [18] и [44]. Некоторые из этих процессов, наряду с изменением объема, меняют также такие свойства нефти как плотность и вязкость. Детально все процессы влияющие на эволюцию нефтяного пятна описаны в работах автора [6] и [26]. Здесь кратко остановимся лишь на ключевых моментах, необходимых для понимания рис. 3.

Адвективное движение пятна нефти как единого целого происходит под воздействием течения, компоненты вектора V_i которого определяются совокупностью ряда составляющих:

$$V_i = V_i^{wid} + V_i^{wad} + V_i^d + V_i^c + V_i^T + V_i^B, \quad (1)$$

где V_i^{wid} и V_i^{wad} соответствует ветровому и волновому дрейфу пятна, которые в общем случае могут не совпадать по направлению; V_i^d – средняя скорость дрейфового течения; V_i^c – средняя климатическая составляющая скорости течения; V_i^T – приливной компонент и V_i^B – вертикальный компонент скорости за счет плавучести. Дрейф пятна под непосредственным воздействием ветра и волн учитывался на основе соотношения $V_i^{wid} + V_i^{wad} = 0.03U_A$ для случая, когда волнение развивается в направлении ветра [20, 32], имеющего скорость U_A .

Капли нефти, образующиеся под поверхностным сликом в результате диспергирования (см. ниже), находятся под воздействием турбулентной диффузии, которая приводит к перемещению капель в водной толще. Эффективность этого дви-

жения по вертикали в совокупности с адвективным переносом, помимо интенсивности самой диффузии, будет определяться также размером и плотностью капель. Некоторые большие капли могут подниматься вверх, примыкая к поверхностному слику. Но если турбулентность достаточно интенсивна, то большинство этих капель остается в толще воды, что в совокупности с поверхностным сликом составляет пятно нефти, охватывающее определенный приповерхностный слой моря. Например, согласно измерениям *in-situ* [17, 22, 35], под сликами нефть была обнаружена на глубине 20 м.

Скорость испарения является основной характеристикой для любой нефти. Когда нефть выливается на поверхность моря, ее летучие компоненты с низкой точкой кипения будут быстро испаряться, уменьшая ее объем. Таким образом, испарение является начальным процессом удаления нефти с поверхности моря. Этот процесс для большинства типов нефти является наиболее важным. В процессе испарения нефть может терять в первые сутки около 25–30% ее легких фракций [31]. Более тяжелые фракции нефти более устойчивы из-за ограниченного испарения, поэтому ее испарение может продолжаться месяцы.

Эмульгирование. Под механическим воздействием волн, напр., вследствие волнового воздействия, капли воды могут захватываться нефтяным пятном, образуя эмульсии типа “вода в нефти”. Такие эмульсии могут иметь широкий диапазон вязкости, в том числе характеризоваться высокой вязкостью, поскольку процесс эмульгирования так же, как и процесс испарения, сопровождается увеличением вязкости нефти.

Диспергирование является процессом, в результате которого нефть или эмульсия удаляется с поверхности морской воды под воздействием поверхностных волн и турбулентного перемешивания. Этот процесс включает в себя образование нефтяных капель, размер диаметра которых меняется в диапазоне от 1 до 500 μm и которые находятся в вертикальном движении. Характерно, что капли диаметром менее 70 μm будут оставаться в диспергированном состоянии почти в любых морских условиях. Движение таких капель происходит под воздействием турбулентной диффузии, конвекции и сил плавучести. Если они остаются ниже поверхности воды, то считаются диспергированными. При этом в отличие от испарения процесс диспергирования идет с одинаковой скоростью, вне зависимости от фракционного состава нефти.

Фотолиз является важным процессом, влияющим на эрозию слика из-за формирования продуктов окисления нефти, которые, в свою очередь, влияют на поверхностные свойства нефтяной пленки, ее растекание и формирование эмульсии “вода в нефти”. Этот процесс, однако, является не-

существенным, как следует из рис.3, в течение первой недели развития нефтяного пятна. Формула учета фотолиза предложена в работе [16].

Седиментация нефти может происходить, когда в результате испарения и эмульгирования плотность нефти становится больше плотности воды, хотя это не доминирующий фактор, заставляющий нефть погружаться. Более вероятно, что присутствие осаждающихся частиц в толще воды приведет к флокуляции нефти, а затем к ее седиментации. В работе [25] на основе экспериментальных исследований сформулирован алгоритм осаждения нефти при флокуляции.

Биодеградация, как видно из врезки на рис. 3, – чрезвычайно медленный процесс, который становится важным лишь на позднем этапе процесса эволюции нефтяного загрязнения. Скорость деградации трудно предсказать из-за высокой растворимости углеводородов, изменчивости в способности различных микробов разрушать углеводороды и др. В настоящее время для оценок скорости биодеградации в море используют данные полученные в лабораторных условиях [21].

2. Описание модели. Как и большинство моделей переноса нефтяного загрязнения, модель, представленная в этой работе, разделена на три главных модуля: 1 – прием входных данных; 2 – расчет траектории движения и количества нефти и 3 – вывод результатов. Последний этап, в свою очередь, разделяется на вывод результатов моделирования движения нефтяного слика и вывод гидрофизических данных. Процедура предсказания поведения нефтяного пятна, соответственно, разделена на две части: 1 – прогностические вычисления циркуляции моря посредством гидродинамического модуля с использованием текущих гидрометеорологических условий и 2 – моделирование нефтяного пятна, которое строится на базе метода случайных блужданий. Последний совместно с вычислением циркуляции позволяет предсказывать трехмерные движения и судьбу отдельных нефтяных капель, совокупность которых составляет нефтяной слик. Таким образом, условно модель можно разделить на два модуля: модуль переноса и гидродинамический модуль.

2.1. Модуль переноса. Основная концепция, принятая в построении этого модуля, аналогична использовавшейся в работе [30], за исключением того, что нефть первоначально разделена на 8 фракций, что позволяет описать процесс испарения с большой точностью. При моделировании [26] вся траектория движения каждой частицы представляется из отрезков, которые она проходит за выбранный шаг по времени. При этом перемещение частицы за единственный интервал составляется из детерминированного движения, благодаря осредненному полю скорости течения, и случайного – за счет турбулентности. Алгоритм расчета прираще-

ния координат $(\Delta x_i)_{j,k}$ для k -ой частицы за j -ый промежуток времени Δt_j можно записать в виде

$$(\Delta x_i)_k^j = V_j^i \Delta t_j + (\eta_i)_k^j$$

$$(i = 1, 3; j = 1, 2, \dots, N_t; k_j = 1, 2, \dots, N_f; \quad (2)$$

$$f = 1, 2, \dots, 8),$$

где $(\Delta x_i)_k^j$ – проекция на ось x_i приращения k -ой частицы за j -ый шаг по времени; N_t – число шагов по времени; N_f – число частиц; V_j^i – проекции на ось x_i вектора скорости течения и $(\eta_i)_k^j$ – случайные приращения координат x_i во время j -го шага.

Первый член в (2) определяет движение частицы под воздействием осредненного (за Δt_j) поля скорости течения, а второй описывает влияние пульсаций скорости течения на движение частицы. Исходя из уравнения (2), траектории частиц можно рассчитывать, если известны поле средней скорости течения и закон распределения $(\eta_i)_k^j$ как функции координат и времени, а также законы, отражающие состояние каждой частицы. Вид закона $(\eta_i)_k^j$ определяется статистической структурой отклонений (пульсаций) скорости от среднего значения за время расчетного шага по времени. Если предположить, что эти пульсации являются слабозависимыми величинами, то можно считать закон распределения $(\eta_i)_k^j$ близким к нормальному. В этом случае $(\eta_i)_k^j$

представляется в виде $(\eta_i)_k^j = \gamma_k^j \sqrt{X_i^{j2}}$. Кроме того, с учетом связи дисперсий $\overline{X_i^{j2}}$ случайно блуждающих

частиц с коэффициентами диффузии $K_i = \frac{1}{2} \frac{dX_i^{j2}}{dt}$, за-

кон распределения $(\eta_i)_k^j$ может быть представлен в виде $(\eta_i)_k^j = \gamma_k^j (2K_i^j \Delta t_j)^{1/2}$, где γ_k^j – случайный вектор, нормально распределенный с нулевым матожиданием и дисперсией, равной единице; $\overline{X_i^{j2}}$ – дисперсия перемещения частиц вдоль оси x_i , а K_i^j – коэффициент диффузии во время расчетного шага Δt_j . Таким образом, для функционирования численного алгоритма (2) помимо поля средней скорости течения необходимо определить $\overline{X_i^{j2}}$ (или K_i^j), что требует создания соответствующих блоков модели или/и привлечения дополнительных данных.

Процесс диспергирования, как было сказано выше, приводит к появлению капель нефти (droplets) с широким спектром их размеров, что будет, в свою очередь, определять вертикальную составляющую скорости движения этих капель. В модуле

переноса это явление учитывается введением диаметра капель d_0 , который задается случайным образом по нормальному распределению в диапазоне $d_{\max} - d_{\min}$. В свою очередь, сила плавучести зависит от плотности и размера капель нефти, а вертикальная скорость w может быть оценена

$$[23] \text{ как } w = \frac{gd^2(1 - \rho_0/\rho)}{18\nu} \text{ для малых } (d \leq d_c) \text{ капель,}$$

$$\text{и как } w = \left[\frac{8}{3} gd(1 - \rho_0/\rho) \right]^{1/2} \text{ – для больших } (d > d_c).$$

Здесь g – ускорение свободного падения; ρ и ν – соответственно плотность и вязкость окружающей жидкости; ρ_0 – плотность капель, а критический диаметр d_c , определяется выражением $d_c = \frac{9.52\nu^{2/3}}{g^{2/3}(1 - \rho_0/\rho)^{1/3}}$ [13]. Из этого следует, что кап-

ли нефти с большими размерами имеют большую плавучесть, с тенденцией оставаться около морской поверхности, в то время как меньшие капли имеют меньшую плавучесть и могут переноситься вглубь турбулентностью. В модели каждая запущенная частица k , принадлежащая к фракции f , характеризуется априорно размером, плотностью, положением в пространстве $X_{i,0}^k$, и периодом распада частицы. Последний параметр задает алгоритмы учета испарения нефти и разного рода процессов деградации, описанных выше. Эти алгоритмы построены на сравнении времени жизни частицы с периодом ее распада. Следует отметить, что в отличие от процессов микробиологического распада частиц нефти, который идет по всей толще воды, процесс испарения возможен лишь для частиц, находящихся в тонком приповерхностном слое z_{ev} . В модели толщина этого слоя была равна 0.1 м.

В качестве выходных данных модель дает возможность следить за количеством испарившейся нефти, ее концентрацией в воде и на поверхности моря, а также за количеством нефти, осевшей на дно и вышедшей на берег.

2.2. Гидродинамический модуль и примеры моделирования циркуляции моря. Как было подчеркнуто выше, в качестве гидродинамического модуля для комплексной модели была выбрана слабодиссипативная модель циркуляции океана DieCAST. Детальное описание модели можно найти в работе [19], поэтому остановимся лишь на особенностях адаптации модели к Черному морю.

Расчетная сетка (z -координатная) модели $(168 \times 92 \times 21)$ покрывала область по горизонтали от 28° до 42° в.д. и от 41 до 46.5 с.ш., т.е. охватывалось все Черное море. Разрешение по долготе выбиралось равным $5'$, при этом по широте оно менялось так, чтобы метрическое отношение $\Delta X/\Delta Y$ сохранялось равным 1. Таким образом,

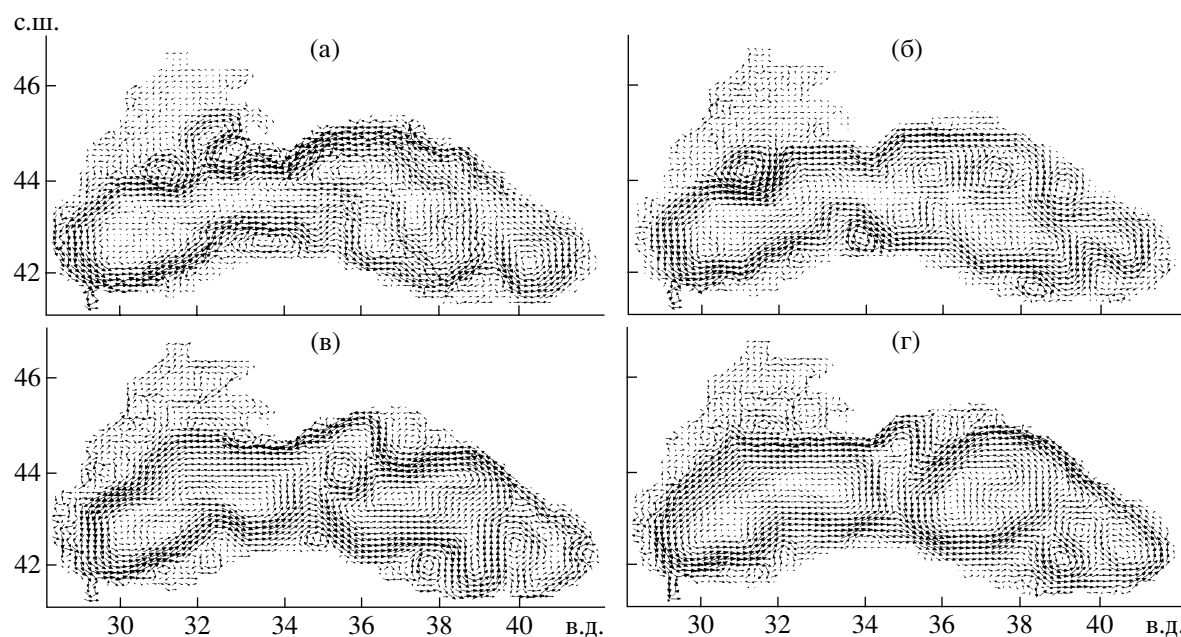


Рис. 4. Расчетные течения в Черном море для 4-х месяцев: (а) – январь; (б) – апрель; (в) – август; (г) – сентябрь.

размеры квадратных ячеек менялись только с широтой от 7 км до 6.4 км. Шаг по вертикали был неоднороден, со сгущением сетки у поверхности моря для лучшего разрешения сезонного термоклина. В модели коэффициенты турбулентной вязкости – как горизонтальные, так и вертикальные – задавались постоянными и равным $10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$, что и позволяло воспроизводить мезомасштабные ПАВ. Численная схема 4-го порядка аппроксимации обеспечивала устойчивость счета при шаге по времени 10 мин.

В качестве климатических данных использовались среднееголетние (ежемесячные) данные по напряжению ветра, температуре, солёности, потокам тепла, испарению, осадкам, стоку 11-ти основных рек и обмену с Босфором. Данные были любезно предоставлены И. Станевой [41]. Время “раскручивания” для получения квазистационарного годового цикла циркуляции составило 20 лет, хотя основные черты циркуляции Черного моря, такие как ОЧТ и циклонические круговороты, волны Россби и захваченные прибрежные волны появляются уже спустя 4 расчетных года. Модель воспроизводит интенсификацию ОЧТ в зимний период и его ослабление и меандрирование в теплое время года, как это следует из натуральных наблюдений.

Относительно формирования холодного промежуточного слоя (ХПС) следует сказать отдельно. Как известно, происхождение ХПС в Черном море обязано двум главным механизмам: стоку холодных распресненных вод на северо-западном шельфе после зимнего периода [28] и конвектив-

ному охлаждению вод в центрах циклонических круговоротов в холодные зимы [9, 10]. Гидродинамическая модель DieCAST хорошо воспроизводит первый, адвективный механизм. ХПС появляется на глубинах 60–90 м, начиная уже с 4-го года “раскручивания” модели. Вместе с тем, как всякая модель, использующая приближение гидростатики, DieCAST не способна воспроизводить конвективный процесс охлаждения, что не позволяет адекватно учитывать этот механизм. В настоящее время негидростатическая версия модели, которая позволит дать полное описание процесса формирования ХПС, находится на завершающей стадии разработки.

На рис. 4а–4г представлены примеры расчета течений для четырех месяцев, характеризующих разные сезоны. Результаты численного моделирования показывают, что модель воспроизводит фундаментальные особенности динамики Черного моря. Видны сезонные колебания в квазистационарном циклоническом ОЧТ, циклонические круговороты в глубоководной части моря, многочисленные антициклонические меандры ОЧТ и вихри, находящиеся между ОЧТ и берегом, в том числе Севастопольский, Батумский и другие, показанные схематично на рис. 2.

Заметим, что квазистационарность Севастопольского антициклонического вихря, отмечающаяся во многих натуральных исследованиях, следует понимать условно. Ее скорее следует понимать так, что к западу от г. Севастополя периодически формируются мощные антициклонические вихри, которые затем “скатываются” по ОЧТ к бере-

гам Болгарии, где и диссипируют. В этом смысле Калиакринский антициклонический вихрь можно понимать как пришедший с северо-востока Севастопольский антициклон. Следует отметить, что ранее движение Севастопольского АЦ удалось детально воспроизвести по результатам спутниковых съемок температуры поверхности моря. В работах [2, 24] дан анализ траектории движения этого вихря в июне–августе 1998г., показавший, что время перемещения вихря, обнаруженного к юго-западу от Севастополя до м. Калиакра составляет около 3-х месяцев, что хорошо соответствует модельным результатам.

Интересно, что иногда к западу от Крыма можно наблюдать трипольные структуры из двух последовательно сформированных антициклонов и циклона. Такие структуры удалось зарегистрировать по данным гидрографических съемок [1, 4, 24]. Модель также может воспроизводить такие структуры. На рис. 4а видно, что в январе подобная трипольная структура формируется к западу от Крымского п-ва.

Формирование и распад Батумского антициклонического вихря (БАВ) отчетливо прослеживается с апреля по август – рис. 4б, 4в. Интересно, что своему появлению Батумский антициклон, как показало моделирование, обязан ПАВ, сформировавшемуся у берегов Турции. Увлекаемый и подпитываемый ОЧТ этот прибрежный антициклонический вихрь, разрастаясь в восточной части моря, приводит к отклонению ОЧТ к северу в этом районе, прослеживающееся вплоть до конца августа (рис. 4в). Далее, в сентябре (рис. 4г), БАВ вытесняется двумя циклоническими вихрями в результате чего появляется трипольная структура в восточной части моря. В дальнейшем БАВ диссипирует, а на его месте в октябре формируется мощный циклонический круговорот, который прослеживается вплоть до января (рис. 4а).

Процесс интенсивного формирования ПАВ наблюдается у берегов Турции и северо-восточного побережья Черного моря. Особенно интенсивно этот процесс идет с марта по август (рис. 4б, 4в). При этом сформированные вихри движутся вдоль берега, “увлекаемые” ОЧТ.

Следует отметить, что сводная картина основных черт циркуляции Черного моря, представленная на рис. 2, а также аналогичная более детальная картина, представленная в работе [8], может означать лишь вероятностную характеристику появления тех или иных элементов циркуляции в отдельных районах. Такие элементы могут рождаться в определенных местах и переноситься в другие, как это было проанализировано в случае с Севастопольским антициклоническим вихрем. Результаты моделирования циркуляции показывают, что, в целом, все прибрежные антициклоничес-

кие вихри, рождающиеся в определенных местах, затем перемещаются вдоль берега.

Следует также остановиться на особенности формирования течений на северо-западном шельфе моря. В используемой версии гидродинамической модели, как было сказано выше, введено 11 основных рек, в том числе и таких рек, как Дунай, Днепр и Днестр, впадающих на северо-западный шельф моря. Поля скорости течения, представленные на рис. 4 показывают, что направление течения, возникающее под влиянием стока рек, в значительной степени зависит от сезона. При этом возникает локальная циркуляция в зоне стока этих рек. Интенсификация переноса пресных вод на юг происходит, в основном, за счет усиления северных ветров и взаимодействия распресненных вод с ОЧТ.

3. Реализация комплексной модели и результаты моделирования переноса нефти. Оперативное применение любой компьютерной модели для мониторинга того или иного явления в природе требует создания удобного интерфейса, позволяющего автоматически вводить необходимые параметры не только исследуемого вещества, но и окружающей среды. Для предлагаемой модели был разработан диалоговый интерфейс, который показан на рис. 5. Этот интерфейс объединяет DieCAST и модель переноса нефти в Черном море. Интерфейс состоит из 8 основных блоков, отвечающих за различные функции. С помощью левого блока вводятся основные параметры модели прогноза загрязнения в случае аварии, а также оперативные данные скорости ветра и высоты волнения. В случае интегрирования модели с метеорологическим комплексом эти данные вводятся автоматически. Здесь также вводятся скорости течения, рассчитанные с помощью гидродинамического блока, построенного на основе DieCAST. При определении района инцидента и ввода источника используется карта акватории. Нажатие левой клавиши “мышки” в точке сброса загрязнения автоматически запускает в этом месте источник и начинается расчет траектории нефтяного пятна и концентрации нефти в зоне загрязнения. Источник может быть как непрерывным, так и мгновенным, в зависимости от исследуемой задачи. При этом оператор может устанавливать требуемую мощность источника в зависимости от поступающих аварийных данных. С помощью модели дается полная картина пространственно-временного распределения поля концентрации нефти, а также сопутствующая информация о физико-химической трансформации (распаде) нефтепродукта и составляющих баланса его массы.

На рис. 6 дан пример временного хода составляющих баланса массы нефти в опыте с непрерывным источником. В этом опыте источник мощностью 130 т/час работал в течение 15 сут,

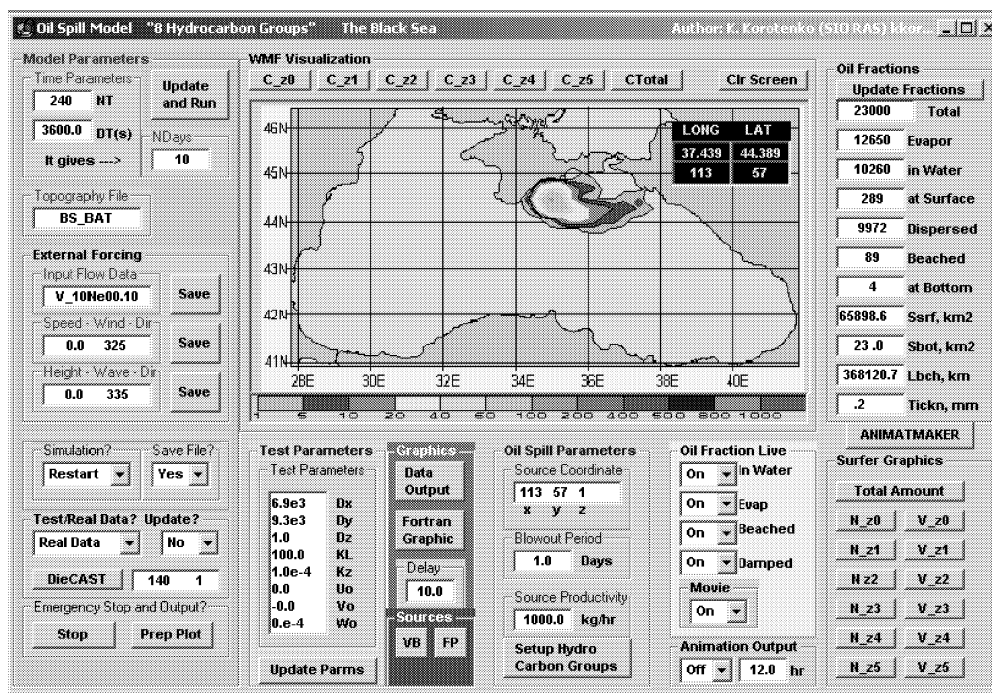


Рис. 5. Диалоговый интерфейс модели переноса нефти в Черном море.

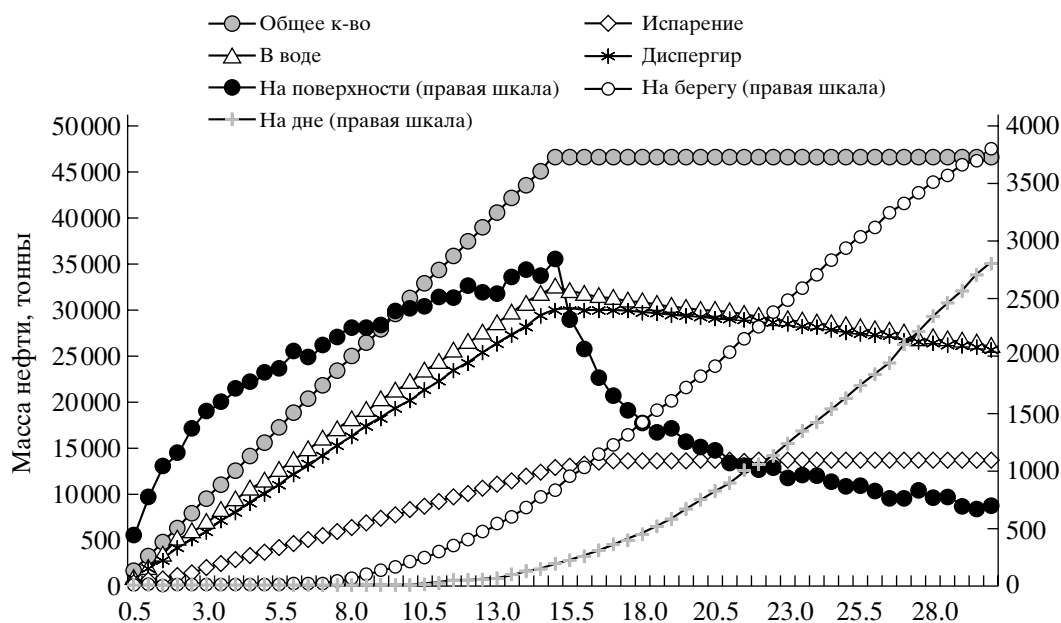


Рис. 6. Пример изменения во времени составляющих баланса массы нефти в опыте с непрерывным источником.

при этом расчеты проводились в течение 30 сут с начала работы источника. На рисунке даны кривые зависимости количества испарившейся нефти, нефти, находящейся в воде, в дисперсной фазе и на поверхности моря, а также количества нефти, осевшей на дно и вышедшей на берег.

Прежде чем анализировать рис. 6, следует сделать некоторые пояснения к нему. На этом рисун-

ке имеются две оси ординат: левая (основная) шкала и правая (вспомогательная). По левой шкале показаны основные быстрорастущие во времени компоненты баланса нефти, такие как общее количество нефти, так и количество испарившейся, находящейся в дисперсном состоянии, и находящейся в воде составляющих. По вспомогательной оси ординат даются фракции с меньшим количе-

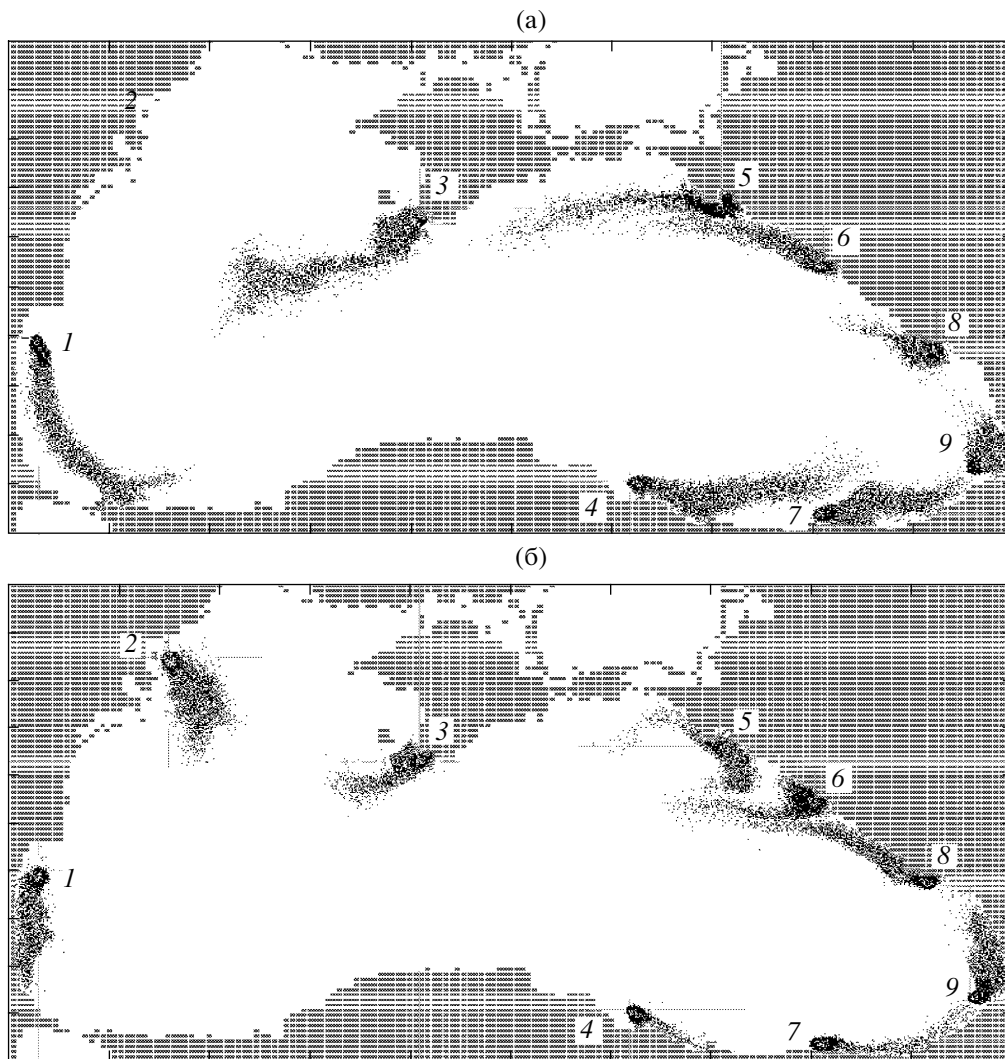


Рис. 7. Примеры моделирования переноса нефти в различных районах Черного моря для (а) – февраля; (б) – июля. Числа вдоль побережья – см.

ством нефти – это нефть, вышедшая на берег, осевшая на дно и находящаяся на поверхности моря. Вспомогательная шкала с меньшим абсолютным количеством нефти позволяет более детально выделить эти фракции и проследить динамику их изменения во времени.

Из рис. 6 видно, что, по мере роста пятна происходит вынос нефти на берег и осаждение ее на дно. Как следует из графика, загрязнение берега начинается с 7-ых суток после начала работы источника. Загрязнение будет достаточно большим: к концу 30 суток на берег выйдет около 3800 тонн нефти. Около 2800 тонн нефти осядет на дно.

Интересным является поведение количества нефти на поверхности моря. Вначале, в период работы источника, несмотря на испарение, количество нефти на поверхности моря растет. Затем, после прекращения поступления нефти ее коли-

чество на поверхности асимптотически падает по мере продолжения испарения, осаждения на дно и загрязнения берега. Несмотря на относительно малое текущее количество нефти на поверхности моря, следует, однако, напомнить что поскольку в природе (а также при моделировании) нефть испаряется с поверхности моря, то общее количество нефти на поверхности складывалось бы из реального количества нефти, находящейся на поверхности, и нефти, которая испарилась. Поэтому, в общем, это количество будет довольно существенным.

С помощью разработанной модели численные эксперименты проводились для выяснения условий, в результате которых разливы нефти в наиболее вероятных точках могли бы представлять серьезную угрозу берегам черноморских стран. Так, сценарии с 10-ти дневными гипотетическими выбросами нефти в 9-ти основных портах Черно-

го моря были исследованы на вероятность попадания нефти на берега Болгарии, Грузии, России, Румынии, Турции, и Украины. В отличие от воздействия на пассивные трассеры (см. напр., [5]), ветер играет доминирующую роль в процессе распространения пятна нефти в приповерхностном слое моря. Поэтому для численного моделирования и сравнения результатов были выбраны 2 месяца, отражающих климатические условия холодного и теплого сезонов. Точки выпуска нефти были выбраны в основных портах стран Черного моря (см. рис. 2).

Результаты моделирования переноса частиц (droplets), совокупность и поведение которых представляют пятна нефти, показаны на рис. 7а, 7б для февраля и июля. Они показывают, что общее направление переноса нефти совпадает с направлением циркуляции в прибрежных водах, хотя нефтяные пятна могут часто удерживаться у побережья из-за преобладающего ветрового дрейфового течения, направленного против ОЧТ. В ряде случаев распространяющиеся нефтяные пятна захватываются прибрежными антициклоническими вихрями, как это показано на рис. 7б (Сочи и Трабзон). Зимой и осенью сильные ветры, интенсифицирующие ОЧТ, способствуют также формированию удлиненных нефтяных пятен, распространяющихся вдоль берега.

Из рис. 7б можно видеть характерный захват нефтяного пятна Севастопольским АЦ. Слабая интенсивность прибрежных потоков и ветров в весенний и летний сезоны ведет, в общем, к относительно коротким пятнам, за исключением того, что сформировался в области Севастопольского антициклона, где движение пятна определяется взаимодействием ОЧТ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная комплексная модель расчета циркуляции и переноса нефтяных загрязнений в Черном море на основе слабодиссипативной модели DieCAST и метода блуждающих частиц позволяет воспроизводить основные особенности гидродинамики моря и предсказывать масштабы и движение областей загрязнений в результате возможных аварийных выбросов нефти в море. Данная модель позволяет оперативно рассчитывать не только концентрацию нефти, находящейся в пятне, но и ее испарившееся количество, а также количество нефти, вышедшей на берег, осевшей на дно и находящейся в дисперсной фракции и на поверхности, а также площади загрязнения поверхности моря и дна. Такая модель может входить в систему оперативного контроля и мониторинга в реальном времени с использованием ассимиляции текущих метеорологических данных на основе разработанный автором системы автома-

тического сбора данных, доступных через систему Интернет (см. [36]).

Следует также подчеркнуть, что предложенная модель универсальна и при соответствующей доработке может быть применена для любой акватории. Данная модель уже достаточно эффективно использовалась для Каспийского и Адриатического морей.

В заключение следует отметить, что структура течений, приведенная на рис. 2 является довольно условной и в реальности она может быть намного сложнее. В ряде случаев возникновение систем циклонических и антициклонических вихрей может значительно искажать общепринятые представления как о циркуляции в Черном море, так и о переносе вещества. Как показали исследования последних лет (см. [4]), такие структуры часто приводят к интенсификации обмена между шельфовыми водами и открытым морем, что может также сказываться на характере переноса нефтяного загрязнения в этом районе.

Авторы выражают признательность И. Станевой за предоставление климатических данных по Черному морю, анонимному рецензенту и А.И. Гинзбург за ряд ценных замечаний и предложений, нашедших отражение в статье.

Работа выполнена в рамках Проекта НАТО по Сотрудничеству (грант № 976642).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гинзбург А.И., Контарь Е.А., Костяной А.Г. и др. Система синоптических вихрей над крутым материковым склоном в северо-западной части Черного моря летом 1993г. (спутниковые и судовые наблюдения) // *Океанология*. 1998. Т. 38. № 1. С. 51–58.
2. Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Незлин Н.П. и др. Антициклонические вихри над северо-западном материковом склоном Черного моря и их роль в переносе богатых хлорофиллом шельфовых вод в глубоководный бассейн // *Иссл. Земли из Космоса*. 2000. № 3. С. 71–81.
3. Зацепин А.Г., Гинзбург А.И., Евдошенко М.А. и др. Вихревые структуры и горизонтальный водообмен в Черном море // *Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря*. М.: Наука, 2002. С. 55–81.
4. Зацепин А.Г., Флинт М. В. Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря. М.: Наука, 2002. 460 с.
5. Ибраев Р.А., Кукса В.И., Скирта А.Ю. Моделирование переноса пассивной примеси вихревыми течениями в восточной части Черного моря // *Океанология*. 2000. Т. 40. № 1. С. 18–25.
6. Коротенко К.А., Мамедов Р.М. Моделирование процессов переноса пятен нефти в прибрежной зоне Каспийского моря // *Океанология*. 2001. Т. 41. № 1. С. 37–48.
7. Кривошея В.Г., Овчинников И.М., Титов В.Б. и др. Меандрирование Основного Черноморского

- течения и формирование вихрей в северо-восточной части Черного моря летом 1994 г. // *Океанология*. 1998. Т. 38. № 4. С. 546–553
8. *Кривошея В.Г., Титов В.Б., Овчинников И.М. и др.* Влияние циркуляции и вихрей на глубину верхней границы сероводородной зоны и вентиляцию анаэробных вод в Черном море // *Океанология*. 2000. Т. 40. № 6. С. 767–776.
 9. *Овчинников И.М., Попов Ю.И.* Формирование холодного промежуточного слоя в Черном море // *Океанология*. 1987. Т. 27. № 5. С. 739–746.
 10. *Овчинников И.М., Попов Ю.И.* Особенности формирования холодного промежуточного слоя в Черном море при экстремальных зимних условиях // *Тр. ГОИН*. 1990. Вып. 190. С. 132–151.
 11. *Титов В.Б.* О роли вихрей в формировании режима течений на шельфе Черного моря и в экологии прибрежной зоны // *Океанология*. 1992. Т. 32. № 1. С. 39–48.
 12. *Титов В.Б.* Экспериментальные данные по меандрированию Основного Черноморского течения // *Океанология*. 1993. Т. 33. № 4. С. 521–526.
 13. *Aravamudan K., Ray P., Ostund J. et al.* Break up of oil on rough seas—simplified models and step-by-step calculation // Report No CG-D28–82, U.S. Coast Guard. 1982. NTIS № ADA118, 372.
 14. *Aubrey D.G., Oguz T., Demirov E. et al.* Hydroblack'91 CTD Inter-calibration workshop. UNESCO, Intergovernmental Oceanographic Commission // Workshop report № 91. 1993. 56 p.
 15. *Blumberg A.F., Mellor G.L.* A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model // *Three-Dimensional Coastal Ocean Models* / Ed. Heaps N. Washington: AGU, 1987. V. 4. 208 p.
 16. *Cochran R., Scott P.* The growth of oil slicks and their controls by surface chemical agents // *J. Petroleum Technology*. 1971. P. 781–787.
 17. *Cretney W.J., Macdonald R.W., Wong C.S. et al.* Biodegradation of a chemically dispersed crude oil // Proc. The 1981 Oil Spill Conference, March 29–5. Atlanta; 1981. P. 37–43.
 18. *Daling S., Brandvik J., Mackay D., Johansen O.* Characterization of crude oils for environmental purposes // *Oil and Chemical Pollution*. 1990. V. 7. P. 199–224.
 19. *Dietrich D.E., Lin C.A., Mestas-Nunez A., Ko D.-S.* A high resolution numerical study of Gulf of Mexico fronts and eddies // *Meteorol. Atmos. Phys.* 1997. V. 64. P. 187–201.
 20. *Elliott A.J.* Shear diffusion and the spread of oil on a water surface of the North Sea // *Deutsche Hydrogr. Zeitschrift*. 1986. 39. № 3. P. 113–137.
 21. *Feng S., Reed M., French D.P.* The chemical database for natural resource damage assessment model system // *Oil and Chemical Pollution*. 1989. V. 5. P. 165–193.
 22. *Genders S.* In situ detection and tracking of oil in the water column // *Oil and Chemical Pollution*. 1988. V. 4. P. 113–126.
 23. *Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Krivosheya V.G. et al.* Mesoscale eddies and related processes in the northeastern Black Sea // *J. Mar. Syst.* 2002. V. 32. P. 71–90.
 24. *Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Nezlin N.P. et al.* Anticyclonic eddies in the northwestern Black Sea // *J. Mar. Syst.* 2002. V. 32. P. 91–106.
 25. *Kolpack R.L., Plutchak N.B., Stearns R.W.* Fate of oil in water environment- Phase II, a dynamic model of the mass balance for released oil // Publication 4313, Washington, D.C. 1977. American Petroleum Institute, P. 34–49.
 26. *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 Science and Technology Bulletin*. 2001. T. 6. № 5/6. P. 323–339.
 27. *Nihoul J.C.J., Djenedi S.* Hierarchy and scales in marine ecohydrodynamics // *Earth Sci. Rev.* 1991. V. 31. P. 255–277.
 28. *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. V. 1. № 40. P. 1597–1612.
 29. *Pakanowski R.S., Dixon K., Rosati A.* The GFDL Modular Ocean Model Users Guide, version 1.0 // GFDL Ocean Group Tech. Rep. 1991. № 2. 176 p.
 30. *Proctor R., Flather R.A., Elliot A.J.* Modeling tides and surface drift in the Arabian Gulf- application to the Gulf Spill // *Cont. Shelf Res.* 1994. V. 14. № 5. P. 531–545.
 31. *Reed M.* The physical fates component of natural resource damage assessment model system // *Oil and Chemical Pollution*. 1989. V. 5. P. 99–123.
 32. *Reed M., Gundlach E., Kana T. A.* Coastal zone spill model: Development and sensitivity studies // *Oil and Chemical Pollution*. 1989. V. 5. P. 441–449.
 33. *Sanderson B.G.* Order and resolution for computational ocean dynamics // *J. Phys. Oceanogr.* 1998. V. 28. P. 1271–1286.
 34. *Sanderson B.G., Brassington G.* Accuracy in the context of a control-volume model // *Atmosphere-Ocean*. 1998. V. 36. № 4. P. 355–384.
 35. *Sorstrom S.E.* The 1985 full scale experimental oil spill at Haltenbanken, Norway // *Oil and Chemical Pollution*. 1987. V. 3. P. 455–469.
 36. *Spaulding M.L., Korotenko K.A., Opishinski T., Galagan C.* TRANSMAP: An integrated, real time environmental monitoring and forecasting system for highways and waterways in RI // Report for URI Transportation Center, Kingston, RI. Kingston, 2001. 44 p.
 37. *Stanev E. V.* On the mechanisms of the Black Sea circulation // *Earth-Science Rev.* 1990. V. 28. P. 285–319.
 38. *Stanev E. V., Beckers J. M.* Numerical simulations of seasonal and interannual variability of the Black Sea thermohaline circulation // *J. Mar. Syst.* 1999. V. 22. P. 241–267.
 39. *Stanev E.V., Rachev N.H.* Numerical study on the planetary Rossby waves in the Black Sea // *J. Mar. Syst.* 1999. V. 21. P. 283–306.
 40. *Stanev E.V., Staneva J.V.* The impact of the baroclinic eddies and basin oscillations on the transitions between different quasi-stable states of the Black Sea circulation // *J. Mar. Syst.* 2000, V. 24. P. 3–26.
 41. *Staneva J.V., Dietrich D.E., Stanev E.V., Bowman M.J.* Mesoscale Circulation in the Black Sea: New results from DieCAST Model Simulations // *J. Mar. Syst.* 2001. V. 31. P. 137–157.

42. *Stoyanov D., Dorogan P., Jelescu S.* The Black Sea contingency planing for marine oil spills // Environmental Degradation of the Black Sea: Challenges and Remedies / Eds. Besiktepe S.T. et al. 1999. V. 2. P. 351–367.
43. *Sur H. I., Ozsoy E., Ilyin Y. P., Unluata U.* Boundary current instabilities, upwelling, shelf mixing and eutrophication processes in the Black Sea // Progr. Oceanogr. 1994. V. 23. P. 249–302.
44. *Wheeler R.B.* The fate of petroleum in marine environment // Special Report, Exxon Production Research Co. Huston, 1978. 125 p.

Modeling Circulation and Oil Spill Transport in the Black Sea

K. A. Korotenko, D. E. Dietrich, M. J. Bowman

A 3-D coupled flow/transport model has been developed to predict the dynamics of the Black Sea and dispersal of pollution. The transport module of the model takes predetermined current and uses Lagrangian tracking to predict the motion of individual particles, the sum of which constitutes a hypothetical oil spill. Currents used in the model have been generated by high resolution, low-dissipative numerical circulation model, DieCAST, implemented for the Black Sea. The basic processes affecting the fate of oil are taken into account and parameterised in the transport model. The combination of specific environmental data and spilled oil characteristics, allows conducting diagnostic and prognostic simulations of behaviour of oil slicks and other contaminants in the marine environment. The effectiveness of the model for the reproduction of the main features of the Black Sea circulation and prediction of the transport and dispersal of oil spills are demonstrated.