

*В.В. Становой, Т.Р. Еремина, Л.Н. Карлин,
А.В. Исаев, И.А. Неелов, Р.Е. Ванкевич*

**ОПЕРАТИВНО-ПРОГНОСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
РАСПРОСТРАНЕНИЯ НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ
В ФИНСКОМ ЗАЛИВЕ**

*V.V. Stanovoy, T.R. Eremina, L.N. Karlin,
A.V. Isaev, I.A. Neelov, R.E. Vankevich*

**OPERATIONAL AND FORECASTING MODELING
OF OIL POLLUTION SPREADING IN THE GULF OF FINLAND**

*Для прогноза распространения нефтяных загрязнений в Финском заливе к оперативной системе GULFOOS подключен модуль, основанный на модели **OilMARS**, разработанной для расчетов переноса и трансформации нефтяного загрязнения в арктических морях. Модель работает в трехмерном варианте и позволяет рассчитывать перенос и трансформацию нефтяных загрязнений на поверхности моря в результате аварийных длительных/моментальных разливов нефти от неподвижных или движущихся источников, распространение пятен нефтяных загрязнений, обнаруженных на поверхности моря, внутриводное распространение дисперсионного шлейфа и нефти, погрузившейся в воду. Модель способна рассчитывать появление и распространение вторичного нефтяного загрязнения на поверхности воды и загрязнение морского дна. Кроме того, модель учитывает влияние сплоченности и дрейфа ледяного покрова на распространение загрязнения, а также попадание нефти на верхнюю поверхность ледяного покрова и под лед в результате сжатия дрейфующего льда. Тестовые испытания совместной работы комплекса прогностических моделей показали, что гидрофизические особенности Финского залива оказывают существенное влияние на распространение и трансформацию нефтяных загрязнений. Таким образом, качество прогноза распространения нефтяных загрязнений в значительной степени зависит от способности гидродинамической модели воспроизводить реальную ситуацию с достаточной точностью.*

Ключевые слова: Финский залив, перенос нефти, оперативная система, прогноз, моделирование, внутриводное загрязнение, ледовые условия.

*To predict the oil pollution spreading in the Gulf of Finland, a module based on the **OilMARS** model and developed for calculation of transfer and transformation of oil pollution in the Arctic seas was introduced into the operational system GULFOOS. The 3D model makes it possible to calculate the transfer and transformation of oil spills on the sea surface resulted from accidental longterm/shortterm oil spills from moving/stationary sources, spreading of oil spills detected on the sea surface, dispersion of oil and plume in the water column. The model makes it possible to calculate the occurrence and distribution of secondary oil pollution on the sea surface and the bottom pollution. Besides, the model accounts for the impact of ice drift and ice concentration on the pollution spreading, as well as the ingress of oil on the upper ice surface or under the ice in case of drifting ice compression.*

Test runs of the forecasting model complex demonstrated that the hydrophysical features of the Gulf of Finland largely affect the advancement and transformation of oil spills. Thus, the quality of oil spill spreading forecast depends greatly on the ability of the hydrodynamic model to reproduce the real situation with sufficient accuracy.

Key words: Gulf of Finland, oil drift, operational system, forecast, modeling, secondary pollution, ice conditions.

Введение

Одним из направлений развития современных оперативных океанографических систем является включение в них модуля для прогноза переноса и трансформации нефтяных загрязнений. В настоящее время для расчета распространения нефтяных загрязнений в Северном, Норвежском и западной части Баренцева морей в практике оперативного прогноза используется модель OSCAR, разработанная в норвежском институте SINTEF [1]. Для прибрежной зоны Португалии и Испании разработан модельный комплекс MOHID, включающий в себя трехмерную гидродинамическую модель и модуль переноса и трансформации нефтяных загрязнений [25]. Объединение этих моделей с испанской моделью погоды позволило создать оперативную систему МЕТЕОМОHID [22]. Для расчета распространения нефтяных загрязнений на акваториях Черного и Азовского морей была разработана модель OILTOX [2, 21], которая может применяться в оперативном режиме. В Балтийском регионе наиболее широкое распространение получила оперативная система прогноза Seatrack Web [23], разработанная в шведском институте метеорологии и гидрологии (SMHI). Модель рассчитывает в оперативном режиме перенос и трансформацию нефтяных загрязнений, дает прогностические параметры загрязнения и рассчитывает «обратный» перенос загрязнения на срок до 10 суток. В совокупности с использованием информационной системы перемещения судов, такие расчеты позволяют идентифицировать судно-загрязнитель для наложения штрафных санкций.

В отечественной практике разработка оперативных нефтяных моделей не имеет такого развития, как за рубежом. К одним из немногих примеров можно отнести оперативную систему VOS-RT [20], работающую на акватории шельфа о. Сахалин [20, 8, 9].

Вместе с тем, создание такой системы для российской части Финского залива представляется весьма актуальной задачей из-за возрастания риска возникновения аварийных разливов вследствие увеличения интенсивности морской транспортировки нефти, строительства нефтяных терминалов и загрязнения акватории от судов.

Оперативная система прогноза распространения нефтяных загрязнений в Финском заливе

В настоящее время для прогноза гидрофизических характеристик состояния вод Финского залива разработана оперативная океанографическая система (ООС) Финского залива GULFOOS [4], результаты оперативно-прогностических расчетов которой размещаются на сайте университета (<http://gulfoos.rshu.ru/>). Для прогноза распространения нефтяных загрязнений в Финском заливе к оперативной системе GULFOOS подключен модуль, осно-

ванный на модели **OilMARS (Oil Spill Model for the Arctic Seas)**, разработанной в ААНИИ для расчетов переноса и трансформации нефтяного загрязнения в арктических морях [11]. Модель переноса и трансформации нефтяных загрязнений **OilMARS** адаптирована к акватории Финского залива и представляет отдельный модуль, который подключается к ООС Финского залива в случае возникновения аварийной ситуации (а) или поступления информации о наличии пятна нефтяного загрязнения (б) на акватории залива (рис. 1).

а) При выборе аварийного разлива вводятся параметры разлива, к которым относятся координаты выброса (географические), дата и время выброса, нефтепродукт (пользователю предлагается выбрать нужный нефтепродукт из базы данных, в которой содержатся необходимые для расчета физико-химические свойства нефтепродуктов), объем нефтепродукта на борту аварийного судна (т.е. максимально возможный объем выброса), тип выброса – продолжительный или мгновенный. В случае продолжительного выброса (наиболее вероятный случай) задаются начальная скорость выброса (т/ч) и скорость выброса через какой-то промежуток времени (т.е. временной градиент скорости). До момента коррекции расчет производится при постоянной скорости выброса (при равенстве двух скоростей) или при линейно убывающей/возрастающей скорости выброса (при неравенстве скоростей). В модели предусмотрен случай, когда источник загрязнения продолжает двигаться. При этом задаются скорость источника в узлах и направление, которые считаются постоянными до момента коррекции. В случае мгновенного выброса задается объем выброса. В модели предусмотрены варианты расчета мгновенного выброса на воду и на поверхность льда.

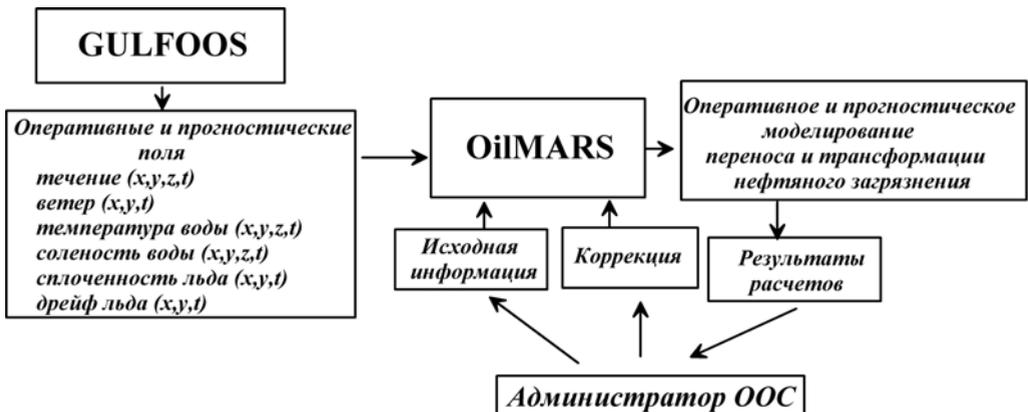


Рис. 1. Схема оперативно-прогностической модели распространения нефтяного загрязнения

б) Для расчета распространения нефтяных пятен на поверхности моря в модели предусмотрены варианты известного и неизвестного нефтепродукта. В обоих случаях вводятся дата и время обнаружения пятен, ориентировочная толщина пятен (по умолчанию – 10 мкм), в случае расчета распространения пятен известного нефтепродукта дополнительно вводится нужный нефтепродукт

из базы данных. Вводятся географические координаты точек и метод аппроксимации. Пользователь в режиме диалога вводит необходимую для расчета исходную информацию, в которую входят вид загрязнения, параметры разлива и параметры расчета.

Поскольку при оперативном расчете отсутствуют какие-либо сценарии развития, как гидрометеорологических параметров, так и параметров разлива, то в модель введена процедура коррекции информации, которая может быть разделена на две части:

– коррекция параметров разлива (или ассимиляция оперативной информации), производимая на основании оперативной информации с аварийного судна или на основе данных аэрофотосъемок и спутниковой информации: изменение координат аварийного объекта; прекращение выброса и поступления нефти на водную поверхность (например, в результате устранения пробоины в борту судна), изменение скорости выброса, изменение скорости и направления аварийного судна. Также предусмотрена возможность коррекции положения пятна и появление в процессе расчета новых пятен.

– коррекция параметров расчета, включающая в себя изменение периода возможной коррекции; периода прогноза; периода выдачи результатов расчета; периода расчета и полное прекращение расчета, когда в результате оперативных мероприятий по ликвидации разлива дальнейший расчет становится нецелесообразным.

Для адаптации модели переноса и трансформации нефтяных загрязнений **OilMARS** к акватории Финского залива учитывалось, что залив представляет собой мелководный и распресненный бассейн с интенсивной динамикой вод, хорошо развитым ветровым волнением и низкой плотностью воды. Кроме того, залив является замерзающим бассейном, имеющим ледовый покров около половины года.

Описание модели

В настоящее время модель **OilMARS** работает в трехмерном варианте, рассчитывая внутриводное распространение дисперсионного шлейфа и нефти, погружившейся в воду [13]. Модель способна рассчитывать появление и распространение вторичного нефтяного загрязнения на поверхности воды и загрязнение морского дна. Кроме того, в ней предусмотрена возможность учета влияния сплоченности и дрейфа ледяного покрова на распространение загрязнения, а также попадание нефти на верхнюю поверхность ледяного покрова и под лед в результате сжатия дрейфующего льда.

Длительный аварийный нефтяной разлив представляется в виде большого числа маленьких дискретных разливов – порций или спиллетов (от англ. *spillet*), которые с определенной периодичностью поступают от источника загрязнения на поверхность воды, в зависимости от скорости разлива, в общем случае переменной во времени. Каждый спиллет имеет набор параметров: координаты,

площадь, плотность и вязкость нефти, количество нефти на поверхности воды, количество испарившейся нефти и т.д. Все параметры спиллетов зависят от времени нахождения данного спиллета на поверхности воды. Используемый в модели подход дает возможность учесть пространственную неоднородность нефтяного пятна, т.е. в каждый момент времени на поверхности воды находятся спиллеты с разной плотностью, вязкостью, массой и площадью.

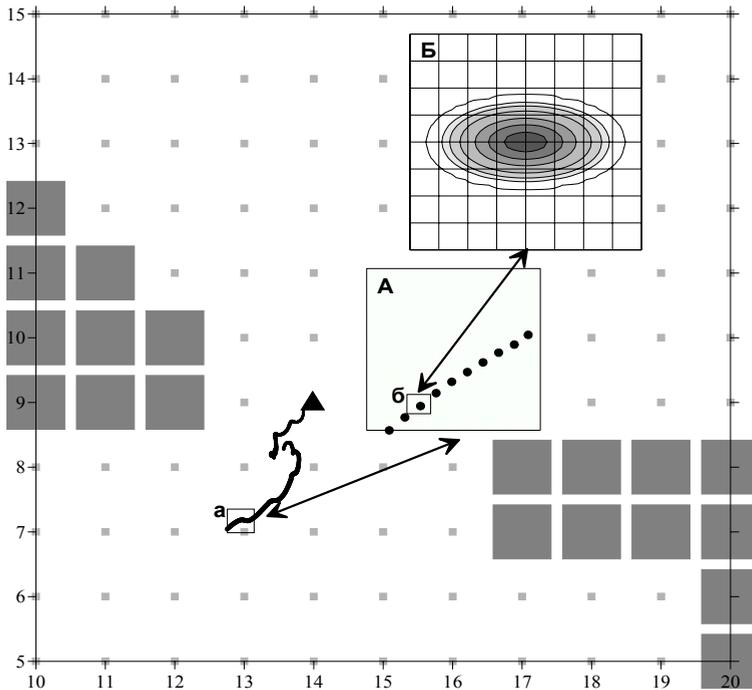


Рис. 2. Схема применения лагранжево-эйлерова подхода к описанию переноса и трансформации аварийного разлива нефти. Области, помеченные строчными буквами, соответствуют врезкам, помеченным прописными буквами. На осях – сеточные координаты

Для расчета переноса спиллетов применяется Лагранжев подход и используется расчетная сетка из модели циркуляции воды (рис. 2). Перенос спиллетов происходит под воздействием ветра, течений и волн. Кроме того, учитывается случайный перенос спиллетов за счет горизонтальной мезомасштабной турбулентности на поверхности моря:

$$\frac{dX_i}{dt} = \vec{U}_i = \vec{U}_{itid} + \vec{U}_{icur} + \vec{U}_{iwind} + \vec{U}_{iwave} + \vec{U}_{idiff}, \quad (1)$$

где X_i – координаты i -го спиллета; U_{itid} – приливная составляющая переноса; U_{icur} – составляющая за счет течения; U_{iwind} – ветровая составляющая; U_{iwave} – волновая составляющая (стоксов перенос); U_{idiff} – диффузионная составляющая.

Для определения вектора суммарных течений используются результаты расчетов на гидродинамической модели. Ветровая составляющая переноса

спиллета принимается по величине равной 3 % от скорости ветра с отклонением от направления ветра на 15° по часовой стрелке [17, 40]. Диффузионная составляющая переноса вычисляется по формуле [2]:

$$\vec{U}_{diff} = P \sqrt{\frac{2K_L}{\tau}}, \quad (2)$$

где P – случайное число $[-1, 1]$; K_L – коэффициент горизонтальной турбулентной диффузии на поверхности воды, рассчитывается по схеме Смагоринского [31]; τ – шаг по времени, с.

Стоксов перенос рассчитывается по формуле [16]:

$$\vec{U}_{wave} = \frac{\sigma k a^2 c h [2k(H - z)]}{2sh^2(kH)}, \quad (3)$$

где σ – частота волны ($=2\pi/T_w$); k – волновое число ($=2\pi/\lambda_w$); a – амплитуда волны ($=h_w/2$); H – глубина. Расчет параметров ветровых волн производится либо с использованием модели ветрового волнения, либо с использованием полуэмпирических зависимостей для развитых волн [14].

При наличии ледяного покрова, по наблюдениям и результатам ретроспективного моделирования [39], скорость переноса нефти существенно уменьшается в зависимости от сплоченности льда и направление переноса нефтяного пятна отклоняется на угол до 60° от предвычисленного направления переноса без учета ледяного покрова. Поэтому при расчетах скорости и направления переноса спиллетов принимается $\vec{U}_{iice} = \alpha \vec{U}_i$, где $\alpha = (1 - C_{it})$ – коэффициент, зависящий от сплоченности льда в ближайших узлах сетки:

$$\begin{aligned} C_{itx} &= C_{ixy} + u_i \frac{\partial C_{ice}}{\partial x} \tau, \\ C_{ity} &= C_{ixy} + v_i \frac{\partial C_{ice}}{\partial y} \tau, \end{aligned} \quad (4)$$

где C_{ixy} – сплоченность льда в точке нахождения данного спиллета; $\frac{\partial C_{ice}}{\partial x, y}$ – гра-

диенты сплоченности льда по осям координат; u_i, v_i – горизонтальные скорости перемещения спиллета. При заходе спиллета в зону большей сплоченности льда производится соответствующее уменьшение площади спиллета с сохранением массы.

При расчетах распространения нефти в ледовых условиях обычно принимается, что при сплоченности льда более 5 баллов нефть движется вместе со льдом [например: 19]. Но, как показали результаты наблюдений за реальным разливом, нефть может двигаться быстрее, чем дрейфующий лед [43]. Поэтому в модели принимается, что при сплоченности льда более 5 баллов спиллет будет переноситься со скоростью дрейфа льда $U_{iice} = U_{drift}$ только при условии $U_{drift} > U_{iice}$ (где U_{drift} – скорость дрейфа льда). В противном случае спиллет пе-

реносится со скоростью U_{ice} .

Для расчета процессов трансформации нефти используется подход Эйлера и сетки с высоким пространственным разрешением, зависящим от начальной массы спиллетов (рис. 1Б). При подходе спиллета к берегу или припаю используются условия непротекания и скольжения. При этом фиксируется участок загрязненной береговой линии.

Процесс эволюции каждого спиллета проходит две стадии: растекания и трансформации. Для расчета растекания нефти до состояния пленки в модели используется стандартный подход [27, 17, 40]. Вследствие малого объема спиллета, процесс растекания занимает всего несколько часов, в течение которых происходит испарение легких фракций нефти и соответствующее уменьшение объема спиллета. Кроме того, учитывается сплоченность ледяного покрова. При этом растекающийся спиллет переносится по поверхности моря. После завершения растекания производится адаптация пятна на прямоугольную расчетную сетку с учетом ветрового воздействия. В зависимости от задаваемой скорости

разлива (V_{sp}), начальная масса спиллетов может быть разной: $m_{i0} = \int_{t_1}^{t_2} V_{sp} dt$, где

$t_2 - t_1 = \tau$ (шаг по времени). Поэтому для каждого спиллета формируется своя расчетная сетка, пространственное разрешение которой зависит от массы данного спиллета.

Дальнейший расчет трансформации каждого спиллета производится путем решения уравнения диффузии для неконсервативной примеси относительно массы нефти.

$$\frac{\partial m_i}{\partial t} = A_{xi}(t) \frac{\partial^2 m_i}{\partial x^2} + A_{yi}(t) \frac{\partial^2 m_i}{\partial y^2} + \sum Q_{mij}, \quad (5)$$

где m_i – масса i -го спиллета; $A_{x,yi}$ – коэффициенты горизонтальной турбулентной диффузии; t – время; $\sum Q_{mij}$ – потеря массы за счет испарения, вертикальной дисперсии и погружения в воду.

На каждом временном шаге (t) производится проверка условия сохранения массы каждого спиллета:

$$m_{i0} = m_{isurf}^t + \int_0^t (m_{ieva} + m_{idisp} + m_{isubm}) dt, \quad (6)$$

где m_{i0} – начальная масса спиллета; m_{isurf} – масса спиллета на поверхности воды в момент времени t ; m_{idisp} – масса нефти, вбитая в воду ветровыми волнами; m_{isubm} – масса утонувшей нефти.

Для расчета процесса испарения нефти в модели используется псевдокомпонентный метод [15], при этом учитывается влияние увеличения вязкости в результате образования эмульсии. Влияние ледяного покрова косвенно учитывается за счет уменьшения площади спиллета.

При расчете процесса горизонтальной диффузии используется коэффициент диффузии, зависящий от пространственных размеров пятна примеси [10]. Кроме того, в расчетную формулу введены два дополнительных коэффициента, зависящие от изменения вязкости нефти и от сплоченности ледяного покрова. Также используется дополнительное условие ограничения величины коэффициента диффузии, связанное с численной реализацией уравнения.

Расчет вертикальной дисперсии нефти в воду при обрушении ветровых волн, в результате чего образуется эмульсия типа «нефть в воде» и шлейф загрязнения в верхнем слое моря с возможной последующей адсорбцией капель нефти на взвешенных минеральных частицах, производится с помощью широко используемого в мировой практике метода [26, 40]. При слабых и умеренных ветрах вклад вертикальной дисперсии во внутриводное загрязнение достаточно мал, но в штормовых ситуациях, когда возрастает риск аварийных разливов, вклад вертикальной дисперсии значительно увеличивается. Так при аварии танкера «Вгаег», произошедшей в 1993 г. у Шетландских островов, шторм перемешал до 40 % поступившей в воду нефти по всей толщине слоя воды. Эта масса нефти переносилась течениями в противоположном ветру направлении, при этом только около 15 % осело на дно [42].

Для образования эмульсии «вода в нефти» необходим минимальный уровень поступающей энергии, которая зависит от скорости ветра и волновых параметров [45]. Отмечается, что при скорости ветра более 12 м/с достаточно быстро происходит дисперсия нефти в воду и эмульсия «вода в нефти» почти не образуется. Кроме того, необходимо чтобы в нефти было высокое содержание смол и асфальтенов [28]. В модели рассчитывается энергетический уровень и индекс стабильности для определения устойчивости эмульсии [45]. В случае, благоприятном для образования эмульсии, производится расчет этого процесса. В модели реализовано два метода расчета процесса образования эмульсии в зависимости от наличия информации о содержании асфальтенов, смол и парафинов в нефти [35, 37].

Отметим, что сырая нефть REBCO (Russian Export Blend Crude Oil), проходящая через нефтяные терминалы северо-запада России, содержит большой процент асфальтенов и смол, что при определенных условиях приводит к образованию устойчивой эмульсии типа «вода в нефти» [28].

При испарении легких фракций нефти и при образовании эмульсий "вода в нефти" значительно увеличиваются плотность и вязкость нефти. Кроме того, плотность и вязкость нефти зависят от изменчивости температуры воды, что особенно важно при расчетах нефтяных разливов в замерзающих морях. Для расчета изменений плотности и вязкости нефти обычно применяются полуэмпирические соотношения [35, 39]:

$$\rho = F_{em}\rho_w + \rho_o(1 - F_{em})(1 + c_{ev}F_{ev})[1 - c_T(T - T_0)] \quad (6)$$

$$\mu = \mu_o \exp\left[a_T\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_o}\right)\right]; \mu = \mu_o \exp[a_{ev}F_{ev}]; \mu = \mu_o \exp\left[\frac{a_1F_{em}}{1 - a_2F_{em}}\right], \quad (7)$$

где ρ_o и μ_o – начальные плотность и вязкость нефти; ρ_w – плотность воды; T – температура воды; T_o – относительная (или предыдущая) температура воды; F_{ev} – массовая доля испарившейся нефти; F_{em} – объемная доля воды в эмульсии; c_{ev} , c_T , a_T , a_{ev} , a_1 , a_2 – эмпирические коэффициенты.

В результате увеличения плотности нефти может быть достаточно небольшого изменения температуры воды или выноса пятна нефти в зону с меньшей поверхностной плотностью воды (зона влияния речного стока, прикромочная ледовая зона), чтобы нефть оказалась тяжелее воды в поверхностном слое и начала тонуть.

Глубина погружения и концентрация загрязнения зависят от плотности, площади и массы затонувшей нефти и плотностной структуры воды. При длительном разливе нефти может возникнуть множество очагов внутриводного загрязнения с различной плотностью нефти, которые, в зависимости от положения и мощности пикноклина, будут располагаться на разных глубинах. Под действием течений и турбулентности будет происходить пространственное распространение и перемешивание нефтяного загрязнения, которое может осесть на отмелях и банках, либо, в зависимости от пространственной неоднородности плотности воды, может выйти на поверхность, образуя вторичный очаг загрязнения поверхности моря.

При моделировании продолжительных разливов, плотность данного объема нефти (спиллета) зависит от времени его нахождения на поверхности воды и физико-химических свойств нефти. Вследствие пространственной изменчивости поверхностного поля плотности воды, различные спиллеты могут погружаться в воду в различное время и в различном месте, когда плотность данного спиллета будет превышать плотность воды на поверхности моря в данной точке. Вследствие этого внутриводное загрязнение имеет многоядерную структуру.

Внутриводное загрязнение является достаточно распространенным явлением. Измерения уровня загрязнения нефтеуглеводородами Балтийского моря и Финского залива, проведенные в 80-е годы, показали, что на поверхности моря в виде пленки содержится менее 4 % загрязнения, 15 % загрязнения содержится в донных осадках и около 80 % загрязнения содержится в воде в виде эмульсий, коллоидных растворов, взвесей и др. [7].

Отметим, что внутриводное загрязнение может быть зафиксировано только прямыми методами измерений (взятием проб воды для определения концентрации нефтеуглеводородов), при этом дистанционные наблюдения с помощью ИСЗ покажут только очищение поверхности воды от нефти.

При разработке модельного блока расчета внутриводного распространения нефти предполагалось, что концентрация нефти и динамика процессов распространения не зависят от состояния нефти в воде (коллоидный раствор, эмуль-

сия, взвешенные капли и т.д.). Предполагается также, что нефть, попавшая в воду под действием ветровых волн (эмульсия типа «нефть в воде») имеет плотность равную плотности воды в поверхностном слое в точке, где произошла дисперсия нефти. Для расчета формируется сеточная область с горизонтальным разрешением (Δx_3 и Δy_3), зависящим от характерных размеров спиллетов и условий устойчивости расчетной схемы. Вертикальное разрешение совпадает с гидродинамической моделью.

Для расчета распространения нефтяного загрязнения в воде использовалось численное решение трехмерного уравнения адвекции – диффузии для вязкой примеси:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \varphi}{\partial t} + u \frac{\partial \varphi}{\partial x_3} + v \frac{\partial \varphi}{\partial y_3} + (w + w_c) \frac{\partial \varphi}{\partial z} = \\ & = \frac{\mu_w}{\mu_{oil}} \left[\frac{\partial}{\partial x_3} A_L \frac{\partial \varphi}{\partial x_3} + \frac{\partial}{\partial y_3} A_L \frac{\partial \varphi}{\partial y_3} + \frac{\partial}{\partial z} A_V \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right] + \sum Q_{subm} + \sum q_{disp}, \end{aligned} \quad (8)$$

где u, v, w – составляющие скорости течения по осям x, y, z , соответственно; w_c – собственная гравитационная вертикальная скорость примеси; μ_w и μ_{oil} – вязкость воды и нефти; A_L и A_V – горизонтальный и вертикальный коэффициенты турбулентной диффузии; Q_{subm} и q_{disp} – мгновенные источники загрязнения за счет затопления и вертикальной дисперсии нефти в воду.

Так как плотность и вязкость в разных очагах загрязнения могут быть различны, и предполагается, что они остаются неизменными, уравнение адвекции и диффузии решается одновременно для концентрации углеводородов и произведений концентрации на плотность и вязкость: $\varphi = \{C; C \cdot \rho; C \cdot \mu\}$. Соответственно, выражения для источников также входят в уравнения в виде источника концентрации и соответствующих произведений. Для уравнения относительно концентрации:

$$Q_{subm} = \frac{m_i}{S_i dh \tau} \delta(t - t_{i0}) \quad \text{и} \quad q_{disp} = \frac{m_{idisp}}{S_i dh_{wave} \tau} \delta(t - t_{i0}) \quad \text{при } \rho_i \text{ и } \mu_i \text{ данного спиллета,}$$

где m_i – масса затонувшего спиллета; m_{idisp} – масса нефти, вбитая волнами в воду; S_i – площадь спиллета, пересчитанная в трехмерную сетку; dh – толщина слоя воды с плотностью равной плотности затонувшей нефти; dh_{wave} – толщина поверхностного слоя волнового воздействия ($\sim 1,5 H_{wave}$); τ – шаг по времени; δ – дельта-функция Дирака; t_{i0} – момент действия источника.

На твердых границах задается условие непротекания, на жидких границах – свободное протекание (вынос загрязнения из расчетной области).

На нижней границе ($z = H$) задается условие непротекания в общем случае или мгновенный поток углеводородов в случае осаждения загрязнения на дно:

$$A_V \frac{\partial C}{\partial z} + w_c C = 0 \quad \text{при } \rho_{oil} \leq \rho_{water}, z=H$$

$$A_V \frac{\partial C}{\partial z} + w_c C = \frac{C_i dh}{\tau} \Big|_{z=H} \delta(t - t_{i0}) = \frac{m_i dh}{\Delta x_3 \Delta y_3 \Delta z \tau} \Big|_{z=H} \delta(t - t_{i0}) \text{ при } \rho_{oil} > \rho_{water}, z=H,$$

где dh – толщина нижнего слоя, из которого масса загрязнения оседает на дно (принимается $dh = 1$ м). После этого, отмечаются координаты места осаждения и масса нефти на дне.

Аналогично на верхней границе ($z = 0$) задается условие непротекания в общем случае или мгновенный поток нефтеуглеводородов в случае образования вторичного загрязнения поверхности воды:

$$A_V \frac{\partial C}{\partial z} + w_c C = 0 \text{ при } \rho_{oil} \geq \rho_{water}, z=0$$

$$A_V \frac{\partial C}{\partial z} + w_c C = \frac{C_i dh}{\tau} \Big|_{z=0} \delta(t - t_{i0}) = - \frac{m_i dh}{\Delta x_3 \Delta y_3 \Delta z \tau} \Big|_{z=0} \delta(t - t_{i0}) \text{ при } \rho_{oil} < \rho_{water}, z=0,$$

где dh – толщина верхнего слоя, из которого масса загрязнения уходит на поверхность воды (принимается $dh = 1$ м).

Принимается, что пятна вторичного загрязнения выходят на поверхность воды со своей плотностью и вязкостью, имеют массу m_i и площадь $S_i = \Delta x_3 \Delta y_3$. После этого пятна вторичного загрязнения переносятся в пространстве аналогично спиллетам первичного загрязнения, подвергаясь воздействию ветровых волн (вертикальная дисперсия). В случае выноса пятен в зону с меньшей плотностью воды, вторичное загрязнение повторно тонет. При наличии ледяного покрова появляется вероятность выхода пятен вторичного загрязнения под лед, поэтому генерируется случайное число $P = [0,1]$ и при $P \leq C_{ice}$ считается, что вторичное загрязнение вышло под лед.

Для численного решения уравнения используется хорошо известная схема коррекции потоков FCT (flux-corrected transport), которая обладает наилучшими свойствами транспортности без искусственной численной вязкости [32]. Для расчета коэффициентов горизонтальной турбулентной диффузии используется схема Смагоринского [31]. Для расчета коэффициентов вертикальной турбулентной диффузии используется схема КРР (K-profile parameterization) [33]. При расчетах учитывается наличие на верхней границе расчетной области дрейфующего льда или припая.

На каждом временном шаге (t) производится проверка условия сохранения массы:

$$\left. \iiint_{\Omega} C(x, y, z) dx dy dz \right|_0^t = \int_0^t (M_{subm} + M_{disp} - M_{sec} - M_{bot}) dt,$$

где Ω – расчетная область; $C(x, y, z)$ – концентрация нефтеуглеводородов в воде; M_{subm} – масса затонувшей нефти; M_{disp} – масса нефти, вбитая волнами в воду; M_{sec} – масса нефти, ушедшей в виде вторичного загрязнения; M_{bot} – масса нефти,

осевшей на дно.

Финский залив около половины года покрыт ледяным покровом. Помимо влияния сплоченности и дрейфа льда на распространение нефтяного загрязнения на поверхности воды, загрязнение самого ледяного покрова может произойти в результате сброса нефти непосредственно на верхнюю поверхность снежно-ледяного покрова или под лед. Используемый в модели подход позволяет также учитывать загрязнение ледяного покрова при сжатии ледяных полей, в результате чего часть нефти оказывается на верхней поверхности льда («lead pumping») или уходит под лед [3, 29].

Нефть, попавшая на верхнюю поверхность ледяного покрова, растекается по поверхности, продолжает испаряться, частично впитывается в снежно-ледяной покров и переносится дрейфующей загрязненной льдиной. Для расчетов процесса растекания нефти на верхней поверхности ледяного покрова и для расчета глубины проникновения нефти в ледяной покров использовались полуэмпирические параметризации, полученные в результате лабораторных и экспериментальных исследований [24, 18, 29].

Нефть, попавшая под лед, растекается и скапливается в полостях и карманах на нижней поверхности ледяного покрова, часть нефти может заполнять трещины и разводы. При этом, процесс загрязнения льда зависит от шероховатости и топографии нижней поверхности. Чем больше впадин и углублений и чем они глубже, тем больше нефти может быть задержано льдом и тем меньше площадь растекания нефти. Для расчета процесса растекания нефти подо льдом используется полуэмпирическое выражение, полученное для горизонтальной и относительно гладкой нижней поверхности льда, т.е. принимается, что горизонтальные размеры пятна нефти меньше расстояний между неровностями льда, ограничивающими растекание нефти [44, 46]. Как показали экспериментальные исследования, перемещение нефти относительно нижней поверхности льда начинается при достижении некоторой критической скорости течения воды относительно льда [34]. При скорости течения меньше критической нефть перемещается вместе со льдом.

При моделировании переноса пятен нефтепродуктов предполагается, что координаты и размеры пятна известны (например, по спутниковой информации). Однако время, когда нефтяное загрязнение оказалось на морской поверхности, неизвестно. Физические и химические свойства нефти (или топлива) могут быть известны или неизвестны (наиболее вероятный случай). В модели рассматриваются оба случая, при этом рассчитываются адвекция, вертикальная дисперсия ветровыми волнами, влияние сплоченности и дрейфа льда. В случае, когда свойства нефти известны, дополнительно производится расчет процессов испарения (последняя фракция) и образование эмульсии типа «вода в нефти» (максимальное значение), если данная нефть способна формировать эмульсию.

Нефтяные пятна на спутниковых снимках обычно имеют вытянутую форму, но могут принимать и достаточно причудливую форму в зависимости от

особенностей динамики района. Для задания начальной формы пятна вводятся координаты оконтуривающих пятно реперных точек (не менее 3). Образующийся неправильный многоугольник равномерно и плотно заполняется частицами (трассерами) с известными или неизвестными свойствами.

Модель была частично верифицирована при проведении спутникового мониторинга северной части Каспийского моря, который проводил инженерно-технологический центр «СКАНЭКС» в районе установки стационарных платформ на месторождении им. Юрия Корчагина. Сравнение результатов моделирования со спутниковыми снимками показало, что модель дает вполне удовлетворительные результаты [5, 6].

Численные эксперименты

Основной задачей проведения численных экспериментов являлась отладка блока ввода-вывода для взаимодействия с оперативной гидродинамической моделью. Расчеты проводились для различных прогнозных гидрометеорологических ситуаций, параметров разлива и расчета. Основное внимание уделялось сценариям распространения загрязнения при наличии ледяного покрова, а также формированию и распространению внутриводного загрязнения в Финском заливе.

В качестве иллюстрации приведем примеры расчетов распространения нефтяного загрязнения осенью 2010 г. (октябрь) и зимой 2011 г. (январь). В приведенных примерах задавались неподвижные модельные источники с постоянной скоростью поступления нефти на поверхность воды (30 тонн/ч) в течение 4–5 суток. Физико-химические свойства нефтепродукта соответствуют свойствам сырой нефти REBCO (плотность 870 кг/м^3 ; кинематическая вязкость 55.9 cSt ; массовая доля асфальтенов, парафинов и смол 12%). На рис. 4 приведена расчетная сеточная область Финского залива и расположение точек, для которых далее приводятся результаты расчетов (осень). Здесь и далее на осях приведены сеточные координаты (шаг сетки $\Delta x = \Delta y = 1852 \text{ м} = 1 \text{ морская миля}$).

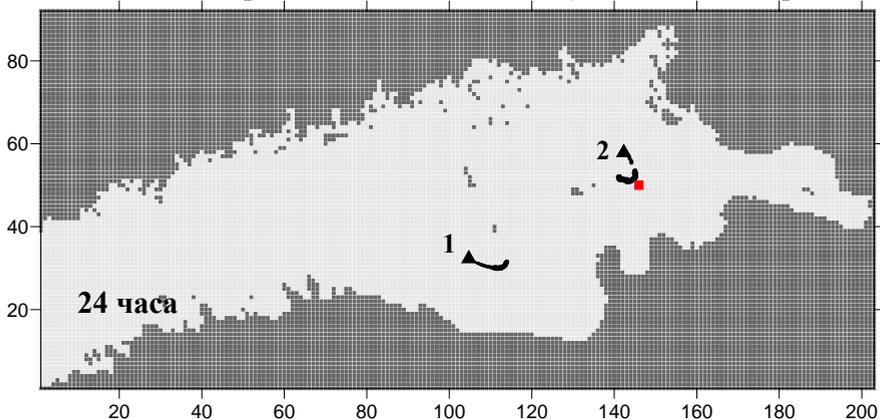


Рис. 4. Расчетная сеточная область Финского залива, расположение точек и результаты расчета распространения нефтяного загрязнения через 24 ч

На рис. 5 приведен пример результатов оперативно-прогностического расчета распространения нефтяного загрязнения в точке 1. На каждой картинке приведены положение «реального» разлива (черный цвет) и прогноз его распространения на сутки вперед (серый цвет).

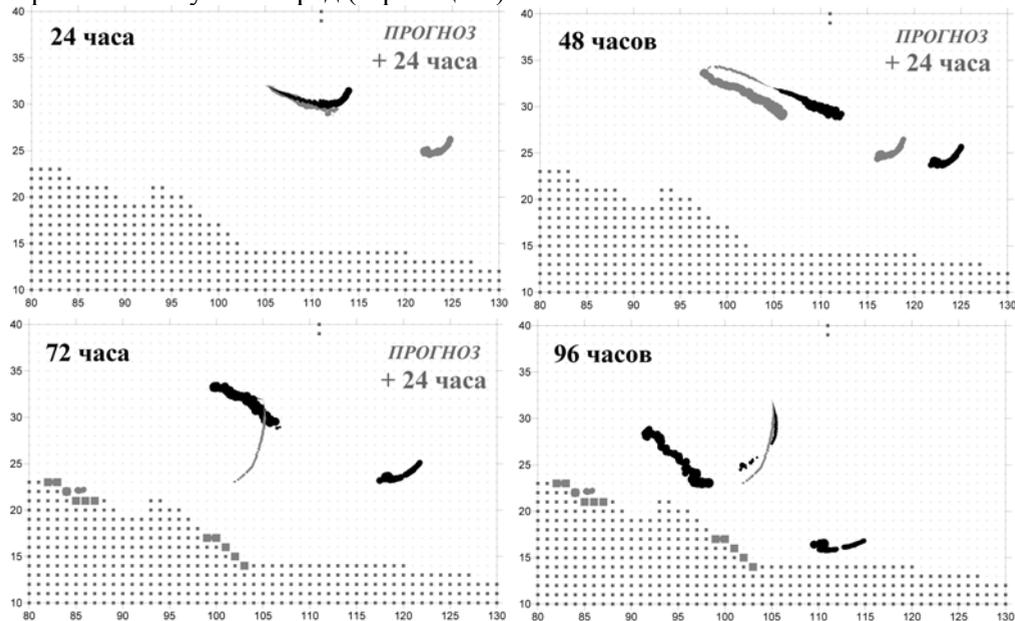


Рис. 5. Пример результатов оперативно-прогностического расчета распространения нефтяного загрязнения в точке 1. «Реальный» разлив (диагноз) – черный цвет; прогноз – серый цвет

Хорошо видно некоторое несоответствие прогностического и «реального» положения пятна загрязнения. Так, прогноз положения пятна на срок 96 ч после начала разлива, данный сутки назад, дал вынос основной массы нефти к берегу и загрязнение обширной береговой черты. Расчет «реального» разлива на срок 96 ч показал, что пятно нефти не дойдет до берега и, соответственно, загрязнение береговой черты через 96 ч после начала разлива не произойдет.

Поскольку в период проведения расчетов скорость ветра составляла 5–10 м/с, под действием ветровых волн происходил процесс вертикальной дисперсии нефти в воду и образование эмульсии «нефть в воде». На рис. 6 приведено распределение концентрации нефтяного загрязнения ($\text{мг}/\text{м}^3$) на горизонте 3 м. Хорошо видна многоядерная структура внутриводного загрязнения. По результатам расчетов с глубиной концентрация нефтяного загрязнения убывает довольно быстро и на горизонте 5 м достигает минимальных значений.

Точка 2 была расположена в восточной мелководной части залива. Сильный ветер в совокупности с пространственно неоднородным полем течения на поверхности воды привели к разрыву пятна загрязнения (рис. 7) и образованию эмульсии «нефть в воде» в верхнем слое моря. Особенности пространственной

неоднородности плотностной структуры воды обусловили образование вторичного загрязнения на поверхности при выносе внутриводного загрязнения в область с большей плотностью воды (рис. 7).

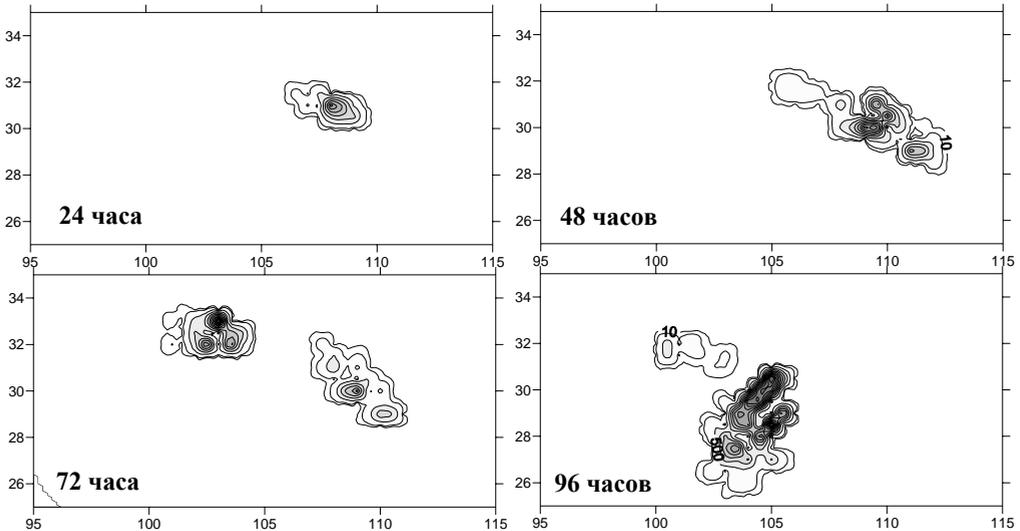


Рис. 6. Распределение концентрации нефтяного загрязнения ($\text{мг}/\text{м}^3$) на горизонте 3 м

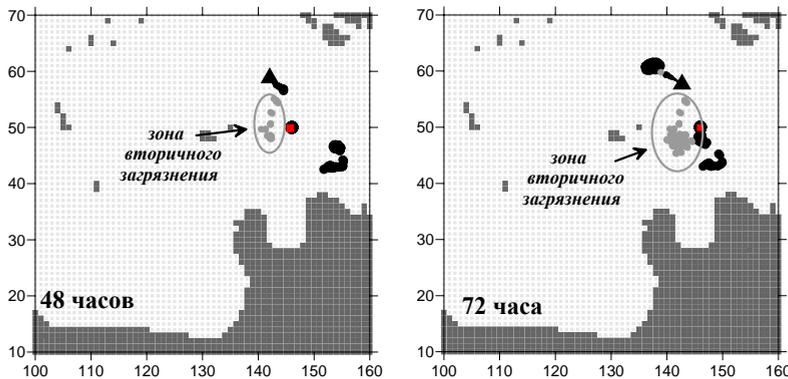


Рис. 7. Пример результатов расчета распространения нефтяного загрязнения в точке 2. Загрязнение на поверхности воды – черный цвет; вторичное загрязнение – серый цвет

Тестовые расчеты распространения нефтяного загрязнения в зимний период (январь 2011 г.) проводились для модельных источников, расположенных в восточной и центральной частях залива. В случае размещения источника аварийного разлива нефти в восточной части залива при сплоченности льда 8–9 баллов, пятно нефти занимало весьма ограниченную площадь, ширина разлива составляла всего 100–200 м, толщина нефти увеличилась до 5–10 мм. Протекание процесса испарения при высокой сплоченности льда замедляется, а образование эмульсий «нефть в воде» и «вода в нефти» не происходит. В результате

такой разлив способен существовать долгое время до сжатия (разрежения) ледяного покрова или до его таяния.

Модельный источник в центральной части залива располагался в точке, где сплоченность льда за четыре дня увеличилась с 4 до 8 баллов (рис. 8). Увеличение сплоченности льда оказывает существенное влияние на траекторию распространения загрязнения, а неоднородность поля скорости дрейфа льда приводит к разрыву пятна. Как показали результаты расчетов, скорость дрейфа льда местами оказалась больше собственной скорости спиллетов, что привело к переносу части пятна вместе с дрейфующим льдом. При этом произошло ограничение площади оставшейся части пятна в районе расположения источника загрязнения.

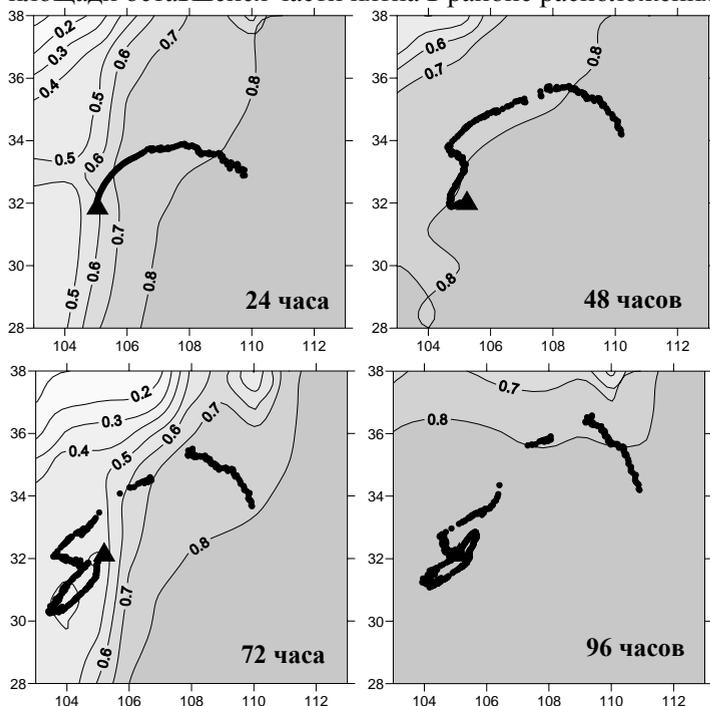


Рис. 8. Пример результатов расчета распространения нефтяного загрязнения зимой в точке, расположенной в центральной части Финского залива. Изолинии представляют сплоченность льда (в долях единицы)

Заключение

Проведенные тестовые испытания показали, что модель **OilMARS** может быть использована для прогноза переноса и трансформации нефтяных загрязнений в качестве модуля в оперативной океанографической системе прогноза **GULFOOS**. Качество прогноза распространения нефтяных загрязнений во многом определяются точностью прогнозов гидрофизических характеристик и ледовых условий в Финском заливе. Для дальнейшей проверки качества расчетов необходимо провести верификацию модели **OilMARS**. В случае аварийных разливов нефти на поверхности воды могут быть зафиксированы положение и форма пятна нефти по результатам аэрофотосъемки или по спутниковым сним-

кам. Концентрация нефтеуглеводородов в толще воды может быть определена при проведении специальных измерений в районе аварии. Такие же параметры могут быть зафиксированы и при распространении пятен нефтепродуктов при судовых разливах. Непременным условием для верификации является отслеживание во времени положения и формы пятен, т.е. проведение регулярного спутникового мониторинга акватории. Опыт использования спутниковой информации [5] показал, что, получая данные о положении и площади пятна и данные для корректировки расчетов, модель может дать информацию о возможных пропущенных при анализе снимка пятнах, при прогностических расчетах модель может помочь определить положение пятен на последующих снимках. Кроме того, модельные расчеты позволяют идентифицировать обнаруженное пятно как новое или как повторное обнаружение пятна с предыдущего снимка.

Литература

1. *Aamo O.M., Reed M., Downing K.* Oil spill contingency and response (OSCAR) model system: sensitivity studies. Proc. Oil Spill Conference, 1997, American Petroleum Institute, p. 429-438.
2. *Бровченко И.А., Мадерич В.С.* Численный лагранжевый метод моделирования распространения поверхностных пятен нефти // Прикладна гідромеханіка, 2002, т. 4(76), No 4, с. 1-9.
3. *Измайлов В.В.* Трансформация нефтяных пленок в системе «океан–лед–атмосфера». Проблемы химического загрязнения вод Мирового океана, т. 9. – Л.: Гидрометеоздат, 1988. – 145 с.
4. *Карлин Л.Н., Рябченко В.А., Ванкевич Р.Е., Еремина Т.Р., Исаев А.В., Неелов И.А.* Испытание оперативной океанографической системы при прогнозе гидродинамических характеристик в Финском заливе Балтийского моря // Фундаментальная и прикладная гидрофизика, 2010, № 3(9), с. 39-48.
5. *Кучейко А.А., Затыгалова В.В., Модеев Р.Н., Становой В.В.* Российские сервисы спутникового мониторинга нефтяных загрязнений морских акваторий: реалии и возможности. // Земля из космоса – наиболее эффективные решения, 2009, вып. 3, с. 25-29.
6. *Кучейко А., Становой В., Филимонова Н.* От космоснимков – к знанию. Моделирование переноса и трансформации нефтезагрязнений в акватории Северного Каспия // Нефть России. Спец. выпуск: Нефтяной сервис, 2010, № 1 (7), с. 20-21.
7. *Нестерова М.П., Немировская И.А., Гурвич Л.М.* Нефтяное загрязнение Балтийского моря, мониторинг, методы борьбы // Материалы Всес. научн. семинара «Методология прогнозирования загрязнения океанов и морей», Севастополь, 25–26 марта 1986 г. – М.: Гидрометеоздат, 1986, с. 35-38.
8. *Овсиенко С.Н., Зацепя С.Н., Ивченко А.А.* Моделирование разливов нефти – оценка риска воздействия на окружающую среду // Тр. ГОИН, 2005, вып. 209, с. 248-271.
9. *Овсиенко С.Н., Зацепя С.Н., Ивченко А.А., Зильберштейн О.И., Попов С.К., Чумаков М.М.* Аварийные разливы нефти (моделирование, риск-анализ, прогноз) // Тр. конф. RAO/CIS OFFSHORE 2009, С.-Петербург, 15-18 сентября 2009, т.2, с. 95-98.
10. *Озмидов Р.В.* Диффузия примесей в океане. – Л.: Гидрометеоздат, 1986. – 278 с.
11. *Становой В.В., Лавренов И.В., Неелов И.А.* Система моделирования разливов нефти в ледовитых морях // Проблемы Арктики и Антарктики, 2007, вып. 77, с. 7-16.
12. *Становой В.В., Ашик И.М., Фильчук К.В.* Оперативная модель распространения нефтяных загрязнений в арктических морях. // Мат-лы Второй международной арктической конф. на выставке «Нева-2009», С.-Петербург, 22 сентября 2009 г., с. 86-88.
13. *Становой В.В., Неелов И.А., Кулаков М.Ю.* Моделирование внутриводного распространения нефтяных загрязнений // Мат-лы Межд. научной конф. «Морские исследования полярных областей Земли в международном полярном году 2007/08», С.-Петербург, 21–23 апреля 2010 г., с. 206-207.

14. *Титов Л.Ф.* Ветровые волны. – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 294 с.
15. *Ткалин А.В.* Испарение нефтяных углеводородов из пленок на гладкой поверхности моря // *Океанология*, 1986, т. 26, вып. 4, с. 628–630.
16. *Филлипс О.М.* Динамика верхнего слоя океана – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 319 с.
17. *ASCE.* State of the art review of modeling transport and fate of oil spills // *J. of Hydraulic Engineering*. 1996, vol. 122, 11, p. 594-609.
18. *Belore R.C., Buist I.A.* Modelling of oil spills in snow // *Proc. of the 11th Arctic and Marine Oilspill Program (AMOP) Technical Seminar*, 1988, Canada, pp. 9-29.
19. *Bobra A.M., Fingas M.F.* The behaviour and fate of arctic oil spills // *Wat. Sci. Tech.*, 1986, vol. 18, p. 13-23.
20. *Bogdanovsky A.A., Kochergin I.E., Budaeva V.D., Makarov V.G., Mishukov V.F., Putov V.F., Rybalko S.L., Uraevsky E.P.* On-line modeling technique for the oil spill fate as applied to the north-eastern Sakhalin shelf (the first Internet version) // *Proc. CREAMS'2000, Vladivostok*, p. 86-93.
21. *Brovchenko I., Kuschan A., Maderich V., Shliakhtun M., Koshebtsky V., Zheleznyak M.* Model for oil spill simulation in the Black Sea // *Proc. of the 3rd Int. Conf. Oil Spills, Oil Pollution and Remediation*. 16-18 Sept., 2003, Bogazici Univ., Istanbul, 2003, p. 101-112.
22. *Carracedo P., Torres-Lopez S., Barreiro M., Montero P., Balseiro C.F., Penabad E., Leitao P.C., Perez-Munuzuri V.* Improvement of pollutant drift forecast system applied to the Prestige oil spills in Galicia Coast (NW of Spain): Development of an operational system // *Marine Pollution Bull*, 2006, vol. 53, p. 350-360.
23. *Cecilia Ambjorn* Seatrack Web forecasts and backtracking of oil spills – an efficient tool to find illegal spills using AIS. *US/EU-Baltic International Symposium, Tallinn, May 27-29 2008. IEEE/OES*, p. 16.
24. *Chen E.C., Overall C.K., Phillips C.R.* Spreading of crude oil on an ice surface // *Can. J. of Chemical Eng.* 1974. 52. P. 71-74.
25. *Coelho H.S., Neves R.J.J., White M., Leitao P.C., Santos A.J.* A model for ocean circulation on the Iberian coast // *J. of Marine Systems*. 2002. vol. 32, p. 153-179.
26. *Delvigne G.A.L., Swinney C.E.* Natural dispersion of oil // *Oil and Chemical Pollution*, 1988, vol. 17, p. 281-310.
27. *Fay J.A., Hoult D.P.* Physical processes in the spread of oil on a water surface // *USCG Report AD-726 281*. Washington. D.C., 1971.
28. *Fingas M., Fieldhouse B., Mullin, J.* Water-in-oil emulsion results of formation studies and applicability to oil spill modeling // *Spill Science and Technology Bulletin*, 1999, vol. 5, No 1, p. 81-91.
29. *Fingas M.F., Hollebone B.P.* Review of behaviour of oil in freezing environments // *Marine Pollution Bull*, 2003, vol. 47, p. 333-340.
30. *Haahiti, H. and Kangas, P.* State of the Gulf of Finland in 2004 // *MERI – Report series of the FIMR*, 2006. – 55 p.
31. *Haidvogel D.B., Beckmann A.* Numerical ocean circulation modeling // *Series on Environmental Science and Management*, vol. 2, Imperial College Press, 1999. – 318 p.
32. *Kowalik Z., Murty T.S.* Numerical modeling of ocean dynamics // *Advanced Series on Ocean Engineering*, vol. 5. World Scientific Publ., 1993. – 481 p.
33. *Large W.C., McWilliams J.C., Doney S.C.* Ocean vertical mixing: a review and a model with a nonlocal boundary layer parameterization // *Reviews of Geophysics*, 1994. vol. 32, No. 4, p. 363-403.
34. *Liu S.K., Leendertse J.J.* A 3-D oil spill model with and without ice cover // *In: Mechanics of oil slicks. Association amical des ingenieurs and international association for hydraulic research*, Paris, 1981, p. 249-265.
35. *Mackay D., Buist I., Mascarenhas R., Paterson S.* Oil spill processes and models // *Environment Canada Report 1980*, Ottawa, Ontario, No EE-8.
36. *Neelov I.A., Eremina T.R., Isaev A.V., Ryabchenko V.A., Savchuk O.P., Vankevich R.E.* A simulation of the Gulf of Finland ecosystem with 3-D model // *Proc. Estonian Acad. Sci. Ecol.*, 2003. vol. 52. No 3. p. 346-359.

37. *Rasmussen D.* Oil spill modeling – a tool for cleanup operations // Proc. of 1985 Oil Spill Conf., American Petroleum Institute, 1985, p. 243-249.
38. *Reed M.* The physical fates component of the natural resource damage assessment model system // Oil and Chemical Pollution, 1989, 5, p. 99-123.
39. *Reed M., Aamo O.M.* Real time oil spill forecasting during an experimental oil spill in the Arctic ice // Spill science and Technology Bulletin, 1994, 1, No 1, p. 69-77.
40. *Reed M., Johansen O., Brandvik P.J., Daling P., Lewis A., Fiocco R., Mackay D., Prentki R.* Oil spill modeling towards the close of the 20th century: overview of the state of the art // Spill Science and Technology Bulletin, 1999, 5, No 1, p. 3-16.
41. *Sobey R.J., Barker C.H.* Wave-driven transport of surface oil // J. of Coastal Research, 1997, 13(2), p. 490-496.
42. *Turrell W.R.* Modelling the Braer oil spill – A retrospective view. // Marine Pollution Bulletin, 1994, vol. 28, p. 211-218.
43. *Wang K., Lepparanta M., Gastgifvars M., Vainio J., Wang C.* The drift and spreading of the Runner 4 oil spill and the ice conditions in the Gulf of Finland, winter 2006 // Estonian J. of Earth Sciences, 2008, vol. 57, No 3, p. 181-191.
44. *Weerasuriya S.A., Yapa P.D.* Unidirectional spreading of oil under solid ice // Can. J. Civ. Eng., 1993, vol. 20, № 1, p. 50-56.
45. *Xie H., Yapa P.D., Nakata K.* Modeling emulsification after an oil spill in the sea // J. of Marine Systems, 2007, vol. 68, p. 489-506.
46. *Yapa P.D., Belaskas D.P.* Radial spreading of oil under and over broken ice: an experimental study // Can. J. Civ. Eng., 1993, vol. 20, № 6, p. 910-922.

Работа выполнена в рамках реализации федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы Министерства образования и науки РФ.