

## СИСТЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ РАЗЛИВОВ НЕФТИ В ЛЕДОВИТЫХ МОРЯХ

В.В. СТАНОВОЙ, И.В. ЛАВРЕНОВ, И.А. НЕЕЛОВ

ГНИЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт

*Разработана система моделирования аварийных разливов нефти в ледовитых арктических морях, состоящая из динамической-термодинамической модели, модели расчета ветровых волн и собственно модели расчета переноса и трансформации нефтяных разливов. В статье приведено краткое описание моделей и результаты численных экспериментов.*

*Сделан вывод, что разработанная система моделирования способна адекватно рассчитывать поведение аварийных нефтяных разливов на поверхности моря как на свободной ото льда акватории, так и в условиях дрейфующего льда. Система при необходимости может быть использована в качестве основы региональной оперативной модели.*

### ВВЕДЕНИЕ

При освоении нефтегазоносных районов шельфа арктических морей и побережья Арктики, к сожалению, не исключена вероятность разливов сырой нефти и топлива при авариях танкеров при перевозках по трассе Северного морского пути и судов, обеспечивающих строительно-монтажные работы на акватории. Наибольшая опасность нефтяного загрязнения в настоящее время угрожает морям Западной Арктики — Баренцеву и Карскому.

В настоящее время разработано и используется достаточно большое количество моделей для расчета и прогноза аварийных разливов нефти [9, 27]. Но арктические моря имеют свои особенности, связанные с наличием ледяного покрова и низкими температурами воды.

За последние 30–35 лет было выполнено большое количество лабораторных и натурных экспериментов по исследованию взаимодействия между нефтью и ледяным покровом. К настоящему времени процессы взаимодействия нефти со льдом достаточно хорошо изучены [например, 3, 10, 12]. Но при моделировании и прогнозе этих процессов возникают существенные проблемы, связанные с различием в пространственных и временных масштабах явлений [9, 27]. Попытки ввести в процесс расчета среднестатистические значения размеров льдин и расстояний между ними [напр., 32, 34], с одной стороны, физически обоснованы, но, с другой стороны, мало пригодны при оперативных расчетах аварийных разливов нефти в арктических морях.

Целью настоящей работы как раз и являлась разработка системы моделирования, способной работать в оперативном режиме.

### ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Система моделирования разлива нефти состоит из трех модулей.

#### 1. Трехмерная динамическая-термогидродинамическая модель

Модель [24] разработана для моделирования синоптической, сезонной и межгодовой изменчивости гидрологических характеристик в Северном Ледовитом оке-

ане и арктических морях. Модель основана на полных уравнениях движения вязкой несжимаемой жидкости в приближениях Буссинеска и гидростатики, уравнениях переноса тепла и соли и уравнении состояния морской воды в форме ЮНЕСКО. Для воспроизведения эволюции ледяного покрова используется термодинамическая модель Хиблера [17] с вязко-пластической реологией. Термодинамическое взаимодействие в системе атмосфера—снег—лед—океан описывается в соответствии с методикой Паркинсона и Вашингтона [25]. Для параметризации вертикального турбулентного обмена используется  $b$ - $L$  модель. Коэффициенты вертикального обмена теплом и импульсом рассчитывались с использованием термодинамических функций [16].

При постановке граничных условий на поверхности учтены процессы ледообразования, таяния, осадки и испарение. На дне и на твердых горизонтальных границах задаются соответственно компоненты вектора касательного напряжения трения и условие непротекания со скольжением.

### **2. Гидродинамическая модель ветровых волн**

Спектрально-параметрическая модель [2, 5] основывается на гипотезе существования устойчивой формы спектра ветрового волнения, контролируемой слаботренируемыми взаимодействиями волн. Модель была детально испытана по данным инструментальных наблюдений в специализированных экспедициях. В модели используется нормировка на динамическую скорость, придающая эмпирическим зависимостям универсальный характер и позволяющая использовать их для расчета волн при больших скоростях ветра.

В связи с большим объемом вычислений уравнение эволюции спектральной плотности волнового действия [4] записывается в параметрической форме [5] относительно трех неизвестных: частоты спектрального максимума, нулевого момента спектра (дисперсия) и среднего направления волн. Кроме уравнений для параметров спектра ветровых волн, модель содержит блок расчета рефракции и распространения зыби. Для численного решения спектрального уравнения баланса волновой энергии используется полулагранжев метод. Модель верифицирована по натурным данным и сопоставлена с результатами расчетов по модели *WAM* [19].

### **3. Модель переноса и эволюции разливов нефти OilMARS v. 2 (Oil spill Model for the Arctic Seas)**

В предыдущей версии модели, разработанной в Арктическом и антарктическом НИИ, были выполнены оценки поведения мгновенного разлива нефти на поверхности льда, подо льдом и переноса нефтяного загрязнения дрейфующим льдом [7, 31]. Настоящая версия модели предназначена для расчета поведения продолжительного разлива нефти в условиях дрейфующего ледяного покрова. Кроме того, модель предусматривает случаи расчета распространения и трансформации «старых» пятен нефти с неизвестными или известными физико-химическими свойствами. Такие варианты расчетов необходимы при обнаружении пятен нефти на спутниковых снимках.

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, определяя скорость разлива (рис. 1). При этом скорость разлива может быть переменной во времени. Предполагается, что дискретные спиллеты независимы друг от друга. Количество спиллетов может быть задано от одного (мгновенный разлив) до любого количества, в зависимости от мощности компьютера. 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. Понятно, что нефть, попавшая на поверхность воды несколько дней назад, должна отличаться по своим свойствам от нефти, выливающейся в данный момент времени. Тем не менее используемые в настоящее время модели не учитывают это явление.

Для расчета переноса спиллетов используется лагранжев подход и расчетная сетка для расчета циркуляции воды (рис. 1 А). Перенос спиллетов происходит под воздействием ветра, течений, волн и дрейфа льда. Ветровая компонента скорости спиллета определялась равной 3 % от скорости ветра с отклонением направления на  $15^\circ$  по часовой стрелке [9, 27]. Направление переноса ветровыми волнами рассчитывалось с помощью модели ветровых волн, скорость переноса принималась равной 1,5 % от скорости ветра или равной волновой стоксовой скорости [30]. Поверхностная циркуляция вод и дрейф льда рассчитываются с помощью трехмерной гидродинамической модели. Приливные течения рассчитывались по гармоническим постоянным [1]. Кроме того, учитывается случайный перенос спиллетов за счет горизонтальной мезомасштабной турбулентности на поверхности моря [28].

Для расчета процессов эволюции нефти используется подход Эйлера и сетки с высоким пространственным разрешением, зависящим от начальной массы спиллетов (рис. 1 Б). При вычислениях соблюдается условие сохранения массы нефти для каждого спиллета и для всей массы разлива. При подходе спиллета к берегу пятно нефти вытягивается вдоль границы с увеличением толщины слоя. При этом фиксируется участок загрязненной береговой линии.

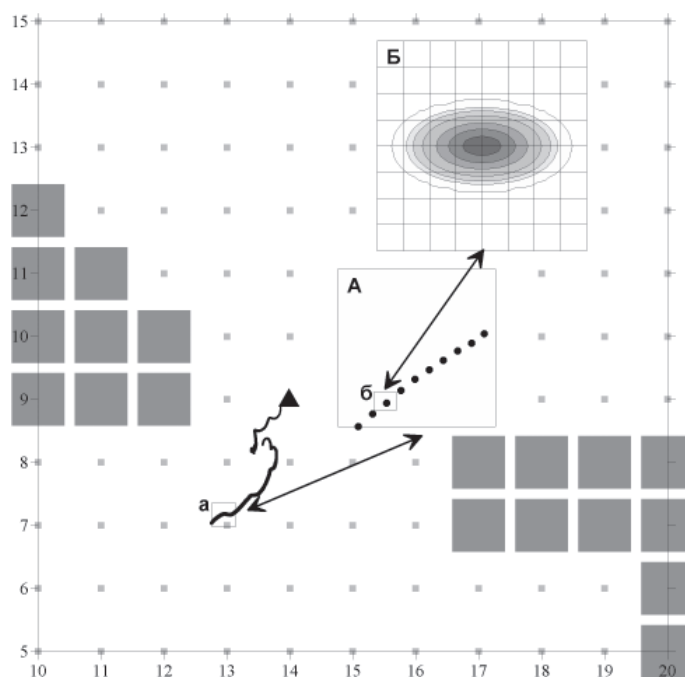


Рис. 1. Схема применения лагранжево-эйлерова подхода к описанию переноса и трансформации аварийного разлива нефти. Области, помеченные строчными буквами, соответствуют врезкам, помеченным прописными буквами; на осях – сеточные координаты

Процесс эволюции каждого спиллета проходит две стадии: растекания и трансформации. Для расчета растекания нефти до состояния пленки в модели используется стандартный подход [14]. 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. Дальнейший расчет трансформации каждого спиллета производится путем решения уравнения диффузии для неконсервативной примеси относительно массы нефти.

Для расчета процесса испарения нефти в модели используется псевдокомпонентный метод [8]. Для учета влияния вязкости на процесс испарения при эмульсификации нефти более 50 % в уравнение для расчета потока нефти на испарение добавлен безразмерный коэффициент, представляющий собой отношение начальной вязкости к текущей. Влияние ледяного покрова косвенно учитывается за счет уменьшения площади спиллета.

В настоящей модели реализовано два метода расчета эмульсификации [22, 26] в зависимости от наличия информации о содержании асфальтенов и парафинов в нефти. Для расчета процессов фотохимического и микробиологического окисления использовались уравнения регрессии, полученные на основе натуральных измерений [3].

Расчет вертикальной дисперсии нефти в воду, т.е. вбивания обрушающимися волнами капель нефти в поверхностный слой моря, в результате чего образуется эмульсия типа «нефть в воде», производится с помощью широко используемого в мировой практике метода [13]. Для расчета горизонтальной диффузии в настоящей модели используется коэффициент диффузии, зависящий от пространственных размеров пятна примеси [6]. 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, т.е. ограничение на сеточное число Рейнольдса.

Плотность и вязкость нефти существенно зависят от изменчивости температуры воды, что особенно важно при расчетах нефтяных разливов в арктических морях. Также плотность и вязкость нефти увеличиваются при испарении легких фракций нефти и при образовании эмульсий «вода в нефти». В настоящей модели для расчета изменений плотности и вязкости нефти применяются широко используемые соотношения [напр., 21–23].

Сплоченность и дрейф льда рассчитывались с помощью трехмерной термодинамической модели. В соответствии с наблюдениями и результатами ретроспективного моделирования [29], скорость переноса нефти существенно уменьшается в зависимости от ледовых условий, и направление переноса нефтяного пятна отклоняется на угол до  $60^\circ$  от предвычисленного направления переноса без учета ледяного покрова. Поэтому при расчетах скорости переноса спиллетов был введен коэффициент, зависящий от сплоченности льда в ближайших узлах сетки.

Используемый в модели подход дает возможность промоделировать поведение нефти при сжатиях льда. При увеличении сплоченности льда до 10 баллов считается, что вероятность попадания нефти на верхнюю поверхность льда или под лед одинакова. Поэтому вводится случайный коэффициент от 0 до 1, определяющий, какая часть массы спиллета оказывается на льду. При этом считается, что оставшаяся часть нефти оказывается подо льдом.

Нефть, попавшая на верхнюю поверхность ледяного покрова, растекается по поверхности, продолжает испаряться, частично впитывается в ледяной покров и

переносится дрейфующей загрязненной льдиной. Для расчетов процесса растекания нефти на верхней поверхности ледяного покрова использовалась полуэмпирическая параметризация [11, 28]. Для расчета глубины проникновения нефти в ледяной покров использовалась параметризация [28].

Для расчета процесса растекания нефти подо льдом используется полуэмпирическое выражение [33], 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. Как показали экспериментальные исследования, перемещение нефти относительно нижней поверхности льда начинается при достижении некоторой критической скорости течения воды относительно льда [3, 10, 12]. При скорости течения меньше критической нефть перемещается вместе со льдом. Величина критической скорости является функцией плотности нефти, поверхностного натяжения нефть–вода, шероховатости льда и толщины нефтяного пятна [20].

При расчетах в качестве входной информации используются: параметры аварийного разлива нефти (местоположение, объем, скорость и продолжительность); информация о физико-химических свойствах нефти (плотность, вязкость, фракционный состав, молекулярный вес, поверхностное натяжение, содержание асфальтенов и парафинов и т.д.); поля ветра (реальные или прогностические) с определенной временной дискретностью; расчетные поля поверхностных течений, температуры и солёности воды, сплоченности и дрейфа льда, поля параметров ветровых волн (направление, высота и период) с определенной временной дискретностью.

В результате расчетов на любой момент времени могут быть выведены по желанию пользователя: траектория переноса нефтяного загрязнения; пространственное распределение площади, массы, толщины, плотности и вязкости нефтяного загрязнения на поверхности воды, на верхней поверхности дрейфующего льда и подо льдом; отмечаются участки береговой черты, где нефть подходила к берегу; баланс массы нефти с указанием количества нефти, оставшейся на поверхности моря, испарившейся, окислившейся, погрузившейся в воду, попавшей на лед и под лед.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Расчетная сеточная область включала в себя Карское и часть Баренцева моря с пространственным шагом 28 км. Численные эксперименты проводились для модельных аварийных разливов нефти в разных точках по трассе Северного морского пути, при разных параметрах разливов и для различных сезонов и сценариев гидрометеорологических процессов. Физико-химические свойства нефти соответствовали свойствам нефти верхнего пласта Приразломного месторождения (Печорское море).

Поля ветра выбирались из базы данных NCEP/NCAR [18] и задавались с временной дискретностью 6 ч. С такой же дискретностью задавались все расчетные гидрологические поля.

Первая серия экспериментов проводилась для безледного периода: сентябрь – первая половина октября. Разливы нефти задавались разной продолжительности, с постоянной скоростью, с линейно убывающей во времени и со «ступенчатой» скоростью, когда в первый день выливается половина всего объема нефти.

Испарение является одним из наиболее важных процессов трансформации нефти. В соответствие с натурными измерениями в Арктике нефтяной разлив теряет за счет испарения от 30 [10] до 70 % своей массы [3] за период 7–10 сут. По результатам наших расчетов получается, что за то же время испаряется 40–60 % общей массы нефти. В соответствии с натурными наблюдениями В.В.Измайлова [3] в Арктике весной и летом потери нефти на фотоокисление достигают до 30 % и на биоокисление до 2–7 % от общей массы. В течение полярной ночи эти про-

цессы отсутствуют. Поэтому при расчетах этих процессов были введены коэффициенты, меняющиеся от 1 (лето, полярный день) до 0 (зима, полярная ночь). Для сентября–октября коэффициенты были приняты равными 0,3–0,2 и потери нефти на фото- и биоокисление – незначительны.

Изучение эмульсий типа «вода в нефти» показало, что устойчивость образующихся эмульсий зависит от содержания в составе нефти асфальтенов, смол и парафинов. Среднеустойчивые эмульсии образуются при содержании асфальтенов от 3 до 7 % и увеличивают вязкость нефти в 20–200 раз [15]. Содержание асфальтенов в нефти Приразломного месторождения составляет около 5,6 %, т.е. образуется среднеустойчивая эмульсия, а вязкость нефти только за счет эмульсификации увеличивается в 25 раз.

Обращает на себя внимание незначительное количество нефти, оказавшееся в воде за счет обрушения ветровых волн, т.е. вертикальной дисперсии. Это можно объяснить сравнительно слабым развитием волнового поля (высоты волн 0,5–2,0 м) и большой вязкостью нефтяного загрязнения.

Увеличение плотности нефти за счет влияния низких температур, испарения легких фракций и эмульсификации приводит к тому, что нефть становится тяжелее поверхностного слоя воды и погружается в воду. Особенно существенно это явление в приустьевом распресненном районе, где, по результатам расчетов, погружается в воду до 50 % от общей массы разлива.

В качестве примера результатов расчетов приведем распределение нефтяного загрязнения и балансы массы нефти после аварийных разливов в четырех точках

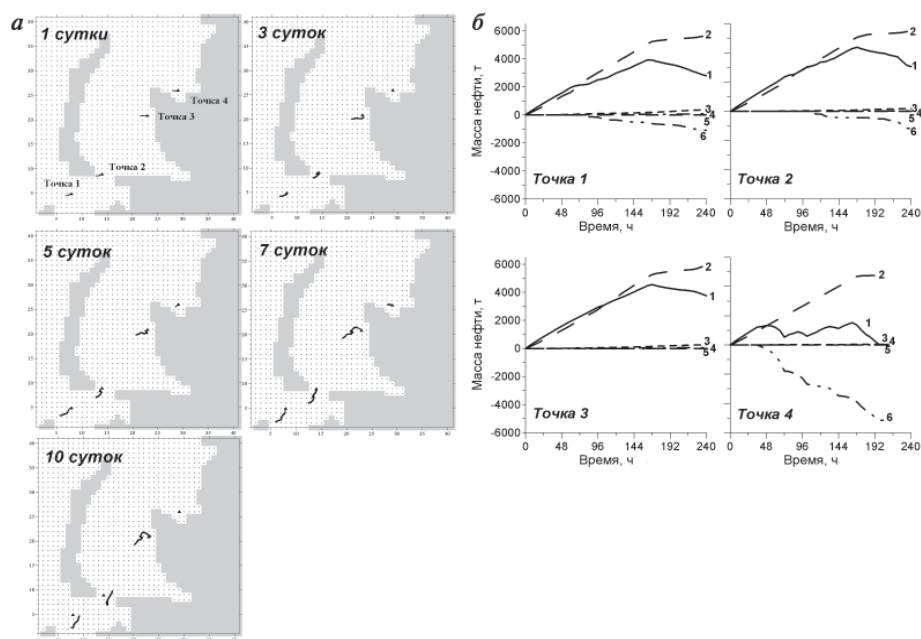


Рис. 2. Пример результатов моделирования аварийных разливов нефти в четырех точках в октябре: *а* – пространственное распространение нефтяного загрязнения и *б* – графики временного изменения баланса массы нефти:

1 – масса нефти на поверхности воды; 2 – масса испарившейся нефти; 3 – масса нефти, потерянная за счет фотоокисления; 4 – масса нефти, потерянная за счет биоокисления; 5 – масса нефти, погружившаяся в воду в результате вертикальной дисперсии; 6 – масса нефти, погружившаяся в воду в результате увеличения плотности

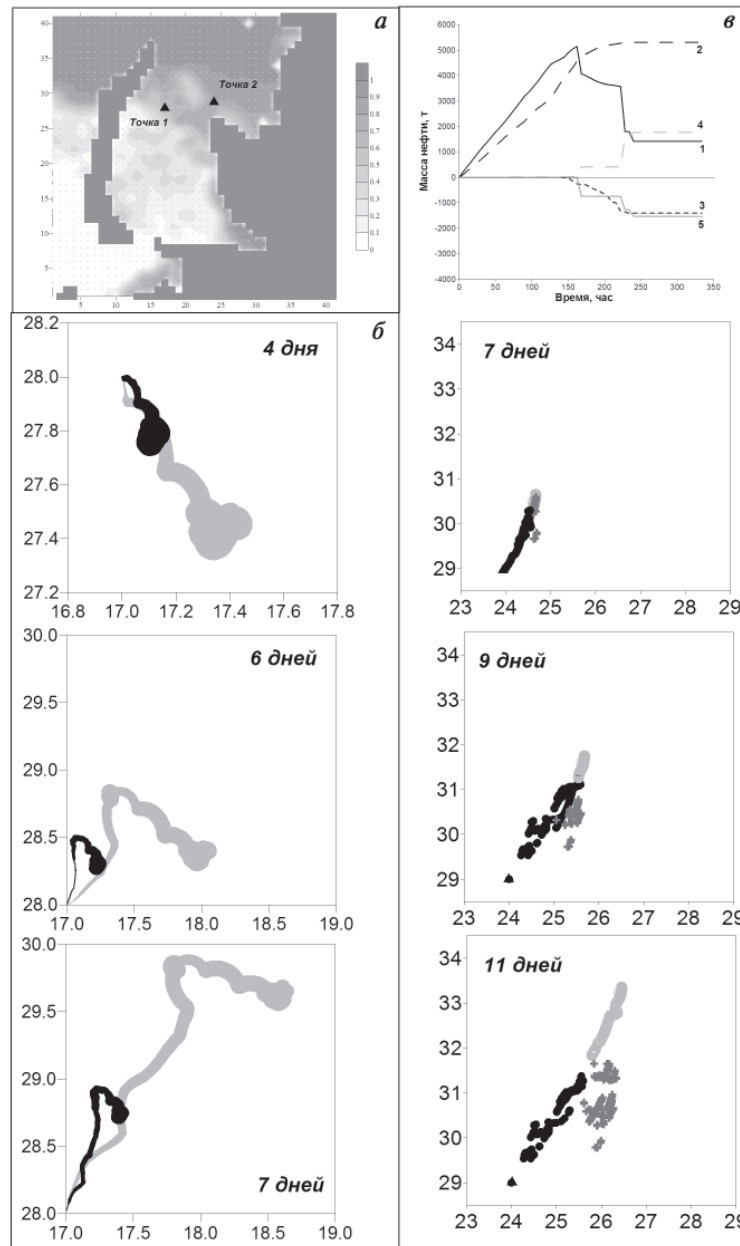


Рис. 3. Пример результатов моделирования аварийных разливов нефти в двух точках во второй половине ноября в условиях дрейфующего ледяного покрова: *а* – пространственное распределение сплоченности льда на начало расчетов и положение точек расчетов, точка 1 – сплоченность льда 3–6 баллов, точка 2 – сплоченность льда 8–10 баллов; *б* – пространственное распространение нефтяного загрязнения в точке 1 при учете ледяного покрова (черный цвет) и без учета ледяного покрова (серый); *в* – баланс массы нефти и положение спиллетов на поверхности воды у кромки зоны сжатия (черная заливка), на поверхности льда (серая заливка) и подо льдом (темно-серая заливка) в точке 2

(рис. 2) в октябре. Условия приведенных экспериментов: масса разливов 10 000 т, скорости разливов постоянны, продолжительность разливов 7 суток, количество спиллетов 1000. Заметим, что на графиках баланса для наглядности погружившаяся в воду масса нефти взята со знаком минус.

Вторая серия экспериментов проводилась для периода с ледовым покровом: вторая половина ноября—декабрь. Разливы нефти задавались разной продолжительности и с постоянной скоростью разлива.

Пример расчета переноса и трансформации нефтяного разлива в условиях дрейфующего ледового покрова приведен на рис. 3. Представленные на рисунке расчеты производились для второй половины ноября для двух точек. Первая точка располагалась в районе со сплоченностью льда 3–6 баллов и вторая — со сплоченностью 8–10 баллов (рис. 3 а). Для первой точки представлены траектории и пространственное распределение нефтяного загрязнения с учетом льда и, для сравнения, результаты расчета при всех тех же условиях, но без учета ледяного покрова (рис. 3 б). Хорошо прослеживается замедление движения и изменение траектории распространения загрязнения, т.е. введение зависящих от концентрации льда коэффициентов позволяет смоделировать физически правильную картину. При сплоченности льда 8–10 баллов (рис. 3 в) головная группа спиллетов через неделю после начала разлива входит в зону сжатия льда, а еще через два дня — в зону интенсивного сжатия. На рисунке приведены баланс массы нефти и положение спиллетов на поверхности воды у кромки зоны сжатия, на поверхности льда и подо льдом. Хорошо видно, что через четыре дня после начала сжатия положение спиллетов, оставшихся на поверхности воды, практически не изменилось, наблюдается небольшое смещение, вызванное дрейфом ледяного покрова. Часть спиллетов, попавшая на верхнюю поверхность льда, постепенно отходит с дрейфующим льдом от места сжатия, а часть спиллетов, оказавшаяся подо льдом, немного отдрейфовала от места сжатия под действием подледных течений.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, разработанная система моделирования способна адекватно рассчитывать перенос и трансформацию аварийных нефтяных разливов на поверхности моря как на свободной ото льда акватории, так и в условиях дрейфующего льда. Система при необходимости может быть использована в качестве основы региональной оперативной модели.

*Работа выполнена в рамках международного ESA-IAF проекта Marine oil spill control: SAR monitoring and model prediction (OSCSAR) и частично по гранту INTAS 06-100025-9264.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Воинов Г.Н.* Приливные явления в Карском море. СПб.: Русское географическое общество, 1999. 109 с.
2. *Давидан И.Н., Лопатухин Л.И., Рожков В.А.* Ветровое волнение в Мировом океане. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 256 с.
3. *Измайлов В.В.* Трансформация нефтяных пленок в системе океан—лед—атмосфера // Проблемы химического загрязнения вод Мирового океана. Т. 9. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 145 с.
4. *Лавренов И.В., Давидан И.Н., Боков В.Н., Дымов В.И., Пасечник Т.А., Яковлева Н.П.* Оценка экстремальных высот ветровых волн в Печорском море // Навигация и гидрография. 1997. № 4. С. 144–151.
5. *Лавренов И.В.* Математическое моделирование ветрового волнения в пространственно-неоднородном океане. СПб.: Гидрометеиздат, 1998. 500 с.



6. *Озмидов Р.В.* Диффузия примесей в океане. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 278 с.
7. *Становой В.В., Кулаков М.Ю., Дмитриев Н.Е.* Расчеты переноса и трансформации нефтяного загрязнения в Печорском море в зимнее время // Материалы Международной конф. РАО-03. СПб., 2003. С. 403–406.
8. *Ткалин А.В.* Испарение нефтяных углеводородов из пленок на гладкой поверхности моря // Океанология. 1986. Т. 26. Вып. 4. С. 628–630.
9. 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.
10. *Bobra A.M., Fingas M.F.* The behaviour and fate of arctic oil spills // Wat. Sci. Tech. 1986. Vol. 18. P. 13–23.
11. *Chen E.C., Overall C.K., Phillips C.R.* Spreading of crude oil on an ice surface // Can. J. of Chemical Eng. 1974. Vol. 52. P. 71–74.
12. *Clark R.C., Finley J.S.* Occurrence and impact of petroleum on Arctic environments // The Arctic Ocean. The hydrographic environment and the fate of pollutants. New-York: Wiley-Interscience, 1982. P. 295–341.
13. *Delvigne G.A.L., Swinney C.E.* Natural dispersion of oil // Oil and Chemical Pollution. 1988. Vol. 17. P. 281–310.
14. *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.
15. *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. № 1. P. 81–91.
16. *Galperin B., Kantha L.H., Hassid S., Rosati A.* A quasi-equilibrium turbulent energy model for geophysical flows // J. Atmos. Sci. 1988. Vol. 45. P. 55–62.
17. *Hibler III W.D.* A dynamic thermodynamic sea ice model // J. Phys. Oceanogr. 1979. Vol. 9. P. 815–846.
18. *Kalnay E. et al.* The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // Bull. Am. Meteorol. Soc. 1996. № 77. P. 437–471.
19. *Komen G.L., Cavaleri L., Donelan M., Hasselmann K., Hasselmann S., Jansen P.* Dynamic and modelling of ocean waves. Cambridge University Press, 1994. 532 p.
20. *Liu S.K., Leendertse J.J.* A 3-D oil spill model with and without ice cover // Mechanics of oil slicks. Paris, 1981. P. 249–265.
21. *Luk G.K., Kuan H.F.* Modelling the behaviour of oil spills in natural waters // Can. J. Civ. Eng. 1993. Vol. 20. P. 210–219.
22. *Mackay D., Buist I., Mascarenhas R., Paterson S.* Oil spill processes and models // Department of Chemical Engineering, University of Toronto. 1980. Toronto, Ontario, Environmental Protection Service Publication Report № EE-8.
23. *Miranda R., Brauschweig F., Leitao P., Neves R., Martins F., Santos A.* MOHID 2000, a coastal integrated object oriented model // Hydraulic Engineering Software VIII, WIT Press. 2000. 480 p.
24. *Neelov I.A.* A model of the Arctic ocean circulation: Proc. of the ACSYS Conf. on the Dynamics of the Arctic Climate System. 7–10.11.94. Goteborg, Sweden, 1996. WMO/TD–No 760. P. 446–450.
25. *Parkinson C.L.* A large-scale numerical model of sea ice // J. Geophys. Res. 1979. Vol. 84. P. 311–377.
26. *Rasmussen D.* Oil spill modeling – a tool for cleanup operations: Proc. of 1985 Oil Spill Conf., American Petroleum Institute, 1985. P. 243–249.
27. *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. Vol. 5. № 1. P. 3–16.
28. *Reed M.* The physical fates component of the natural resource damage assessment model system // Oil and Chemical Pollution. 1989. Vol. 5. P. 99–123.
29. *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. Vol. 1. № 1. P. 69–77.

30. *Sobey R.J., Barker C.H.* Wave-driven transport of surface oil // J. of Coastal Research. Spring, 1997. Vol. 13. № 2. P. 490–496.
31. *Stanovoy V., Guzenko R., Jakobsson T.* Ice/pollution interactions: detection, modelling, prediction and monitoring: Abstracts of the Scientific Workshop OCEAN OPS 04. Toulouse, France, 2004. P. 80.
32. *Venkatesh S., El-Tahan H., Comfort G., Abdelnour R.* Modelling the behaviour of oil spills in ice-infested waters // Atmosphere-Ocean. 1990. Vol. 28 № 3. P. 303–329.
33. *Yapa P.D., Chowdhury T.* Spreading of oil under ice // J. Hydraul. Eng. 1990. Vol. 116. № 12. P. 1468–1483.
34. *Zatsepa S., Ivchenko A., Ovsienko S.* Mathematical modeling of oil behaviour in ice: Proc. Of Combatting Marine Oil Spills in Ice and Cold Conditions, National Board of Waters and the Environment. Helsinki, Finland, 1993. P. 175–184.

V.V.STANOVOY, I.V.LAVRENOV, I.A.NEELOV

### OIL SPILL MODELING SYSTEM FOR ICE-INFESTED SEAS

*The modeling system of accident oil spills in the ice-infested arctic seas is developed. This system consists of dynamic-thermodynamic model, wind waves model and oil spill transport and transformation model. The brief description of models and results of numerical experiments are presented.*

*The conclusion is made, that the developed modeling system is capable to adequately describe the behaviour of accident oil spills on the ice-free sea surface and under drifting ice conditions. The system, if necessary, can be used as a basis of regional operative model.*