

7.4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АКВАТОРИИ И БЕРЕГОВОЙ ЛИНИИ АЗОВСКОГО МОРЯ ПРИ РАЗЛИВАХ НЕФТЕПРОДУКТОВ

С.В. Бердников, В.В. Кулыгин

Аннотация. Рассмотрен подход, применяемый для оценки загрязнения акватории и береговой линии Азовского моря при разливах нефтепродуктов. Используемая модель учитывает следующие процессы, происходящие с нефтью: растекание, перемещение под действием течений и ветра, волновое воздействие вблизи береговой линии, испарение, растворение нефти в воде. Численные эксперименты для оценки зон загрязнения выполняются на основе сценариев гипотетических аварий, возникающих при морской транспортировке нефти и нефтепродуктов. Представлены результаты расчета вероятности загрязнения береговой зоны Азовского моря в разные сезоны года.

Ключевые слова: нефтеразливы, математическое моделирование, Азовское море

Моделирование разливов нефти является одним из основных элементов в системе подготовки эффективных стратегий борьбы с опасными разливами нефти, а также при планировании мероприятий по ликвидации чрезвычайных ситуаций. Такие модели основаны на возможности прогнозирования морских условий за счет использования атмосферных, волновых и гидродинамических численных моделей в сочетании с информацией о местоположении и характере разлива нефти.

Существует большое количество программных комплексов, позволяющих моделировать поведение нефти в водоеме. Например, при реализации проекта Mediterranean Decision Support System for Marine Safety (MEDESS-4MS) (<http://www.medess4ms.eu/>) несколько независимых моделей нефтяных разливов для разных частей Средиземного моря: MOTHY (<http://www.meteorologie.eu.org/mothy/>), MEDSLIK (<http://www.oceanography.ucy.ac.cy/medslik/>), MEDSLIK-II (<http://medslikii.bo.ingv.it/>), POSEIDON-Oil Spill Model (<http://osm.hcmr.gr/>) – были объединены в единую мультимодельную систему прогнозирования. Это позволило использовать общую систему обмена данными, обеспечивающую оперативный доступ к информации о нефтяных разливах с платформ мониторинга, к данным Marine Core Service и национальных океанографических систем прогнозирования, к информации из таких ресурсов, как система мониторинга передвижения морских судов. Таким образом, сервис MEDESS-4MS в состоянии предоставить конечным пользователям возможность использовать любую из моделей и доступные данные для прогнозирования дрейфа нефти по всему Средиземному морю.

Целью статьи является описание подхода, применяемого для оценки загрязнения акватории и береговой линии Азовского моря при разливах нефтепродуктов. Предлагаемый метод основан на развитии математической модели, использовавшейся для прогнозирования распространения и трансформации нефти в Баренцевом море [Бирюков и др., 2011].

Материалы и методы

Описание математической модели. После поступления нефти в морскую среду ее трансформация во времени и пространстве определяется рядом физических, химических и биологических процессов, которые представлены на рисунке 1.

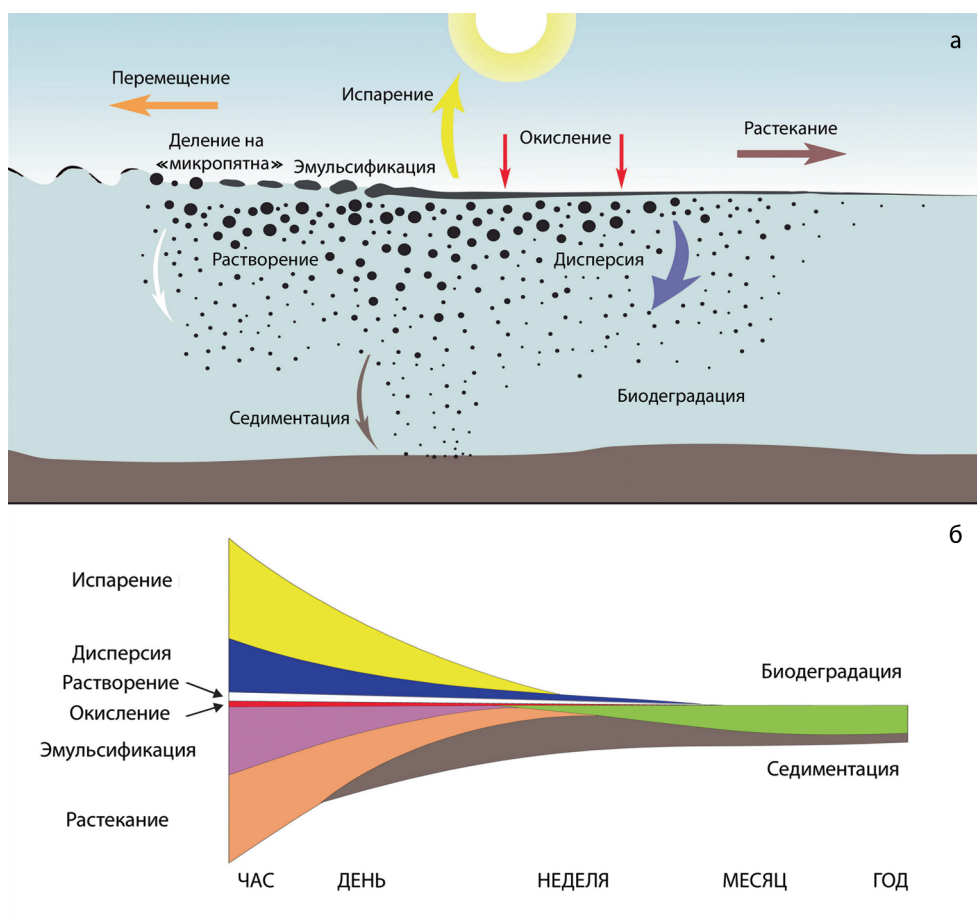


Рис. 1. Процессы, определяющие трансформацию нефти в море (а), и схематическое их представление во времени (б) (по [Fate of marine oil spills, 2002], с изменениями)

Моделирование переноса пятен нефти под действием ветра и течений реализовано методом Лагранжа. В модель включены стохастические элементы, используемые при оценке параметров влияния ветра и течений на перенос нефти. В дополнение к перемещению частицы нефти при разливе претерпевают изменения, связанные с различными физическими процессами. В течение первых нескольких часов разлив распространяется механически на поверхности воды под действием гравитационных сил. Кроме того, легкие фракции нефти испаряются, а остальные фракции начинают процесс растворения в воде. При достижении заданной толщины пленки или определенного времени первоначальное «большое» пятно случайным образом делится на N частей одинакового размера, каждая из которых обладает определенной массой и в дальнейшем считается «микропятном». Затем для каждого «микропятна» рассчитывается траектория его перемещения до тех пор, пока «микропятно» не достигнет береговой зоны / кромки льда или не выйдет за границы расчетной области.

Пусть V_t – объем нефти в пятне (м^3), A_t – площадь его поверхности (м^2) и H_t – его толщина (м) в момент времени t , тогда обновление объема имеет вид

$$V_{t+\Delta t} = V_t - \Delta V_t^{(e)} - \Delta V_t^{(d)}, \quad (1)$$

где $\Delta V_t^{(e)}$ – объем испарившейся нефти, $\Delta V_t^{(d)}$ – объем растворенной нефти, Δt – шаг расчета по времени.

После обновления объема пятна его площадь также обновляется на каждом шаге с использованием полуэмпирических формул растекания (см. ниже). Новая толщина пятна вычисляется согласно

$$H_t = V_t / A_t. \quad (2)$$

Предполагается, что при достижении толщины H_c , равной 10 микрометрам, исходное пятно, образовавшееся при разливе, распадется на множество «микропятен» и дальше толщина «микропятен» не уменьшается.

Алгоритм расчета переноса нефти после разлива имеет следующий вид:

- растекание нефти и ее перенос в консолидированном состоянии в течение определенного времени $[0; T_1]$;
- деление пятна на отдельные фрагменты, «микропятна», в момент времени T_1 ;
- перемещение отдельных фрагментов под действием течений и ветра на отрезке времени $[T_1; T_2]$.

Момент времени T_1 (когда пятно разделяется на отдельные частицы) или задается как параметр модели, или определяется по толщине пятна нефти. В качестве параметра модели указывается и число частиц, центры которых случайным образом распределяются в пределах пятна (рис. 2), размеры которого зависят от характера процесса растекания в интервале времени $[0; T_1]$.

Расчет перемещения «микропятен» происходит в интервале $[T_1; T_2]$ без учета их возможного взаимодействия между собой. Параметр T_2 определяет время окончания расчета. При этом каждое «микропятно» за это время или покидает расчетную область, или попадает на берег/лед, или остается в акватории.

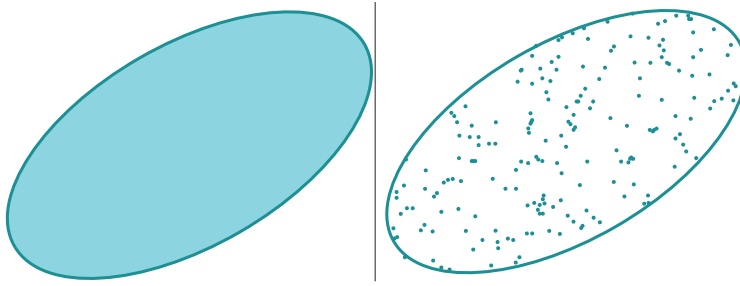


Рис. 2. Пример консолидированного пятна нефти (слева) и его разделение на «микропятна» (справа)

Рассмотрим подробнее процессы, учитываемые в модели.

Растекание. Изменения параметров пятна на фазе распространения под действием сил поверхностного натяжения могут быть описаны уточненными на основе результатов натурных экспериментов полуэмпирическими формулами Дж. Фея [Fay, 1971] в модификации [Зуев, Ильин, 1996]. Диаметр пятна в направлении, перпендикулярном направлению ветра (R_y , м):

$$R_y = \alpha \sigma (V_0)^b t^c, \quad (3)$$

$$\sigma = \left(\frac{\rho_w - \rho_0}{\rho_w} \right)^a,$$

где ρ_w и ρ_0 – плотность морской воды и нефти (г/см^3); V_0 – объем первоначального разлива (м^3); t – время (мин); $\alpha = 42,5$; $a = 1/3$; $b = 1/3$; $c = 1/4$.

Диаметр пятна нефти в направлении ветра (R_x , м)

$$R_x = R_y + \beta W^d t^e, \quad (4)$$

где W – скорость ветра, м/с; $\beta = 1,82$; $d = 4/3$; $e = 3/4$.

Площадь пятна (в форме эллипса) в момент времени t будет в таком случае равна

$$A_t = \pi R_x(t) R_y(t) / 4. \quad (5)$$

Перемещение. Итоговый перенос пятен нефти (как исходного, так и «микропятен») есть результат совместного действия ветра и доминирующих в данном районе течений. Уже при скорости более 1,35 м/с нефтяные слики как целое переносятся быстрее, чем в процессе растекания. Для расчета траектории центра пятна дрейфующей нефти используется подход, предложенный в работе [Зуев, Ильин, 1996], на основе схемы переменных ускорений, имеющей третий порядок точности по времени:

$$X_{t+\Delta t} = X_t + \frac{\Delta t}{2} (V_{t+\Delta t} + V_t) - \left(\frac{\Delta t}{2} \right)^2 \left(\left(\frac{\partial V}{\partial t} \right)_{t+\Delta t} - \left(\frac{\partial V}{\partial t} \right)_t \right), \quad (6)$$

где X_t – вектор координат центра пятна, V_t – вектор скорости смещения центра пятна, Δt – шаг расчета по времени. При этом

$$V_t = k_w W_t + k_u U_t + k_s(L) \cdot F_t, \quad (7)$$

где W_t – вектор скорости ветра на высоте 10 м от поверхности; U_t – вектор суммарных поверхностных (ветровых и приливных) течений; F_t – вектор фактора влияния берега; k_w – коэффициент влияния ветра (в модели принято, что каждое «микропятно» имеет свой коэффициент, случайным образом выбранный из допустимого диапазона 2–4 %); k_u – коэффициент влияния течений, при расчетах принятый равным $k_u = 1,0$; k_s – коэффициент влияния берега, зависящий от расстояния до береговой линии L .

В рамках модели учтено, что в береговой зоне по мере уменьшения глубины (примерно с половины длины волны) волны начинают разворачиваться к берегу и на «микропятна» начинает действовать береговой фактор. Данное воздействие работает лишь в случаях, когда угол между нормалью к берегу и вектором ветра отличаются не более чем на 90° . С уменьшением расстояния до берега воздействие увеличивается. Коэффициент влияния берега – эмпирическая величина, подбираемая в ходе вычислительных экспериментов.

При достижении пятном нефти береговой зоны / кромки льда часть нефти остается на побережье/льду. Конкретная величина нефти, выброшенной на берег, определяется коэффициентом, устанавливаемым для каждого типа граничной зоны (табл. 1). При достижении пятном нефти водной границы области моделирования считается, что оно покидает расчетную область и далее не участвует в расчетах.

Таблица 1. Типы границ расчетной области

№	Тип границы
1	Песчаный пляж
2	Пляж из песка и гравия
3	Галечный пляж
4	Скалистый берег
5	Дамбы, бетон и т.д.
6	Мыс
7	Защищенный песочный или галечный пляж
8	Защищенный скалистый берег
9	Защищенный болотистый или илистый берег
10	Лед
11	Открытая водная граница

Испарение. Каждое нефтяное пятно рассматривается как состоящее из различных фракций, испарение которых способствует уменьшению объема нефти на поверхности моря и является одним из первых процессов деструкции нефти после ее попадания в морскую среду. В модели предусмотрено до 12 фракций нефти, отличающихся температурой начала кипения. На каждом временном шаге доля каждой фракции нефти уменьшается в соответствии с представленным ниже алгоритмом испарения.

Для учета испарения нефтепродуктов используется уравнение [Maskay, Leinonen, 1977]:

$$\Delta N_{Ei} = \frac{K_e X_i P_i A \Delta t}{RT}, \quad (8)$$

где ΔN_{Ei} – изменение количества вещества компонента с номером i за счет испарения, моль; K_e – коэффициент массопереноса для углеводорода, м/с; X_i – молярная доля компонента с номером i , равная $\frac{M_i}{\sum M_i}$; M_i – молярная масса компонента с номером i , г/моль; P_i – давление насыщенных паров компонента i , Па; A – площадь пятна нефти, м²; Δt – шаг по времени, с; $R = 8,314$ Дж/моль · К – универсальная газовая постоянная; T – температура окружающей среды над поверхностью нефтяного пятна, К.

Для расчета коэффициента массопереноса углеводорода используется эмпирическая формула [Buchanan, Hurford, 1988]

$$K_e = 0,0025 \cdot W^{0,78}, \quad (9)$$

где K_e – коэффициент массопереноса для углеводорода, м/с; W – скорость ветра, м/с.

Молярные массы входящих в состав нефти компонентов рассчитываются на основе температур кипения по упрощенной формуле [Мановян, 2001]:

$$M_i = 60 + 0,3 \cdot (T_i - 273,15) + 0,001 \cdot (T_i - 273,15), \quad (10)$$

где T_i – средняя температура кипения компонента с номером i , К; M_i – молярная масса компонента с номером i , г/моль.

Для определения давления насыщенного пара фракции используется уточненная формула [Антонченков, 1994]:

$$\lg P_i = A \cdot \left[1 - \left(\frac{T_i \cdot \lg T_i}{T_w \cdot \lg T_w} \right) \cdot \lg B \right], \quad (11)$$

$$A = 2,9 + \alpha_1 T_i - \alpha_2 M_i + \alpha_3 T_i M_i, \quad B = 10 + \frac{\alpha_4}{T_i} + \frac{T_w}{M_i^2},$$

где $\alpha_1 = 0,0125$, $\alpha_2 = 0,058$, $\alpha_3 = 0,0000482$, $\alpha_4 = 0,0000005$, P_i – давление насыщенных паров компонента i , кг/см²; T_w – температура воды, К.

Итоговый объем испарившейся нефти на шаге t равен

$$\Delta V_t^{(e)} = \frac{\sum_i \Delta N_{Ei} \cdot M_i}{\rho_o}, \quad (12)$$

где $\Delta V_t^{(e)}$ – объем испарившейся нефти, м³; ΔN_{Ei} – изменение количества вещества компонента с номером i за счет испарения, моль; M_i – молярная масса компонента с номером i , г/моль; ρ_o – плотность нефти, г/м³.

Растворение. Некоторые из компонентов, входящих в состав нефти, подвержены как испарению, так и растворению в воде. Основное влияние на интенсивность этого процесса оказывает число атомов углерода. Наибольшей растворимостью обладают компоненты с небольшим количеством атомов углерода. В процессе растворения порядка 10 % от общей массы нефти переходит в воду.

Моделирование процесса растворения аналогично испарению. Потери нефти за счет растворения рассчитываются по формуле [Maskay, 1981]

$$\Delta N_{D_i} = K_d X_i S_i A \Delta t \quad (13)$$

где ΔN_{D_i} – изменение количества вещества компонента с номером i за счет растворения, моль; K_d – коэффициент массопереноса для углеводорода, м/с (принят константой $3 \cdot 10^{-6}$ м/с); S_i – растворимость компонента с номером i , моль/м³.

Величина растворимости изменяется со временем нахождения нефти на водной поверхности. Вначале разлива нефть обладает максимальной растворимостью, которая постепенно уменьшается. Зависимость растворимости от времени выражается формулой [Arai, 2001]

$$S = S_0 e^{-0,1t}, \quad (14)$$

где S_0 – начальная растворимость нефти, г/м³.

Итоговый объем растворившейся на шаге t нефти рассчитывается по формуле, аналогичной (12).

Сценарное моделирование загрязнения акватории и береговой зоны. Модельные расчеты для оценки зон загрязнения выполняются на основе сценариев гипотетических аварий, возникающих при добыче на шельфе или при морской транспортировке нефти и нефтепродуктов. В состав сценария входит информация о нефтеразливе и сопутствующей гидрометеорологической ситуации. Для определения условий гипотетической аварии задаются следующие параметры:

- координаты места аварии;
- дата и время аварии;
- объем разлива;
- тип или сорт нефти.

Гидрометеорологические условия, сопутствующие нефтеразливам, задаются сценариями изменения во времени полей течений и ветра, температуры воздуха и воды, а также ледовой обстановки.

Расчет риска загрязнения береговой зоны Азовского моря в случае аварий при транспортировке нефтепродуктов. Для исследования рисков загрязнения акватории моря в случае аварий при транспортировке нефтепродуктов используется следующий подход. Определяются все основные маршруты транс-

портировки. Полученный в итоге транспортный путь делится на участки. Для каждого из участков на основе информации о количестве судов и объемах перевозимых ими нефти определяется индекс опасности разлива нефти, на основе которого и информации о повторяемости ветровых ситуаций в различные сезоны проводятся модельные эксперименты для оценки возможного загрязнения акватории и береговой линии. Каждый численный эксперимент представляет собой моделирование события – залпового сброса нефти – на одном из выделенных участков. В результате серии экспериментов могут быть построены вероятностные карты загрязнения береговой зоны и акватории для соответствующих сезонов. Впервые это сценарный метод был использован в работе [Бирюков, 2010].

При исследовании Азовского моря поля скорости ветра задавались на основе информации о повторяемости ветровых ситуаций в различные сезоны [Гидрометеорология ... 1991]. В качестве полей поверхностных течений были использованы результаты гидродинамической модели SASMO [Чикин, 2009], входящей в состав системы прогнозирования EX-MARE [Berdnikov et al., 2018]. Расчеты для зимнего сезона не проводились, поэтому ледовая обстановка не задавалась. Расчетная сетка модели при сценарном моделировании загрязнения Азовского моря соответствовала сетке модели SASMO – 300 м.

Результаты и обсуждение

Для Азовского моря рассматривались маршруты из следующих портов: Ростов-на-Дону, Ейск, Мариуполь, Бердянск, Геническ, Приморско-Ахтарск, Таганрог и Темрюк (рис. 3). Весь транспортный путь был разделен на 81 участок. Для каждого из участков пути был проведен расчет индекса опасности разлива нефти I_{os} , измеряемого в условных баллах (от 0 до 100) и пропорционального количеству судов, перевозящих нефтепродукты по указанному участку [Эколого-экономические проблемы ... 2009]. Были подготовлены сценарии аварийных разливов в точках, расположенных вдоль основных морских путей транспортировки грузов в Азовское море.

В ходе моделирования был проведен ряд залповых сбросов нефтепродуктов (объемом 1000 т) из каждой точки маршрута транспортировки нефти в Азовском море. Всего было проведено 648 экспериментов, учитывающих 81 точку сброса и 8 направлений ветра по основным румбам. Растекание нефти и формирование начального пятна (слика) контролировалось толщиной пленки. В дальнейшем выполнялось его деление на 100 микропятен, каждое из которых в результате вычислительного эксперимента или рассеивалось в водной толще, или достигало береговой линии, или покидало границы акватории Азовского моря. В результате каждого модельного эксперимента оценивалась территория загрязнения нефтью береговой зоны.

Для оценки вероятности загрязнения береговой зоны при аварийных разливах нефти граничная область моделирования была разделена на ряд участ-

ков: выход в Керченский пролив; части береговой линии Азовского моря, характеризующие преобладающую водную растительность: травы, макроводоросли, тростник; участки береговой линии с отсутствием подверженной загрязнению растительности [Степаньян, Кулыгин, 2018]. Для каждого из сезонов (кроме зимы) и всего года в целом результаты оценки объемов нефти, достигших береговой зоны, для всех сценарных экспериментов суммировались. Эта итоговая суммарная величина для конкретного участка береговой зоны рассматривалась как относительная величина, характеризующая вероятность загрязнения береговой линии в соответствующий сезон. На основе этих данных получены вероятностные картосхемы загрязнения береговой зоны по сезонам (рис. 4). По картосхемам видно, что зоны максимального вероятного загрязнения соответствуют направлению преобладающих ветров.

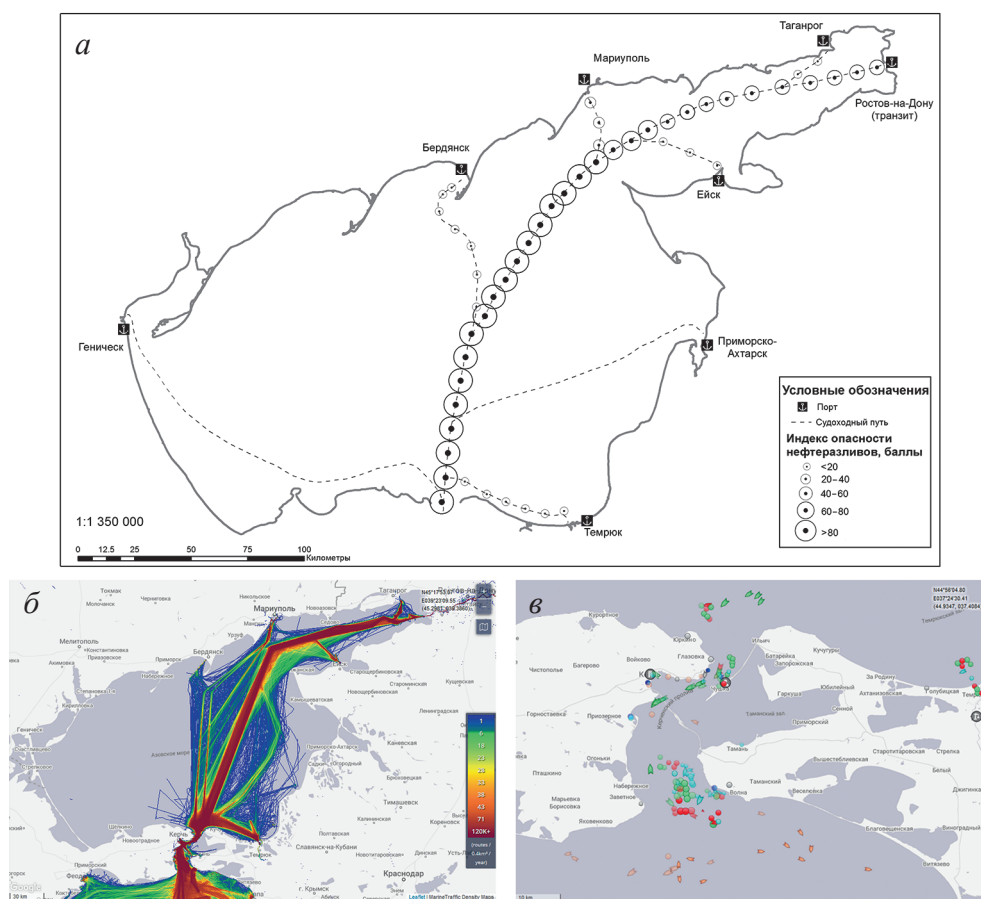


Рис. 3. Транспортная нагрузка в Азовском море: *а* – картосхема маршрутов и индекс опасности нефтеразливов; *б* – плотность судовых маршрутов за 2017 г. (число маршрутов на единицу площади $0,4 \text{ км}^2$ в год), по данным АИС (Автоматическая идентификационная система) (<http://www.marinetraffic.com/>); *в* – ситуационная карта транспортной обстановки в Керченском проливе 18.11.2019, по данным системы АИС (<http://www.marinetraffic.com/>)

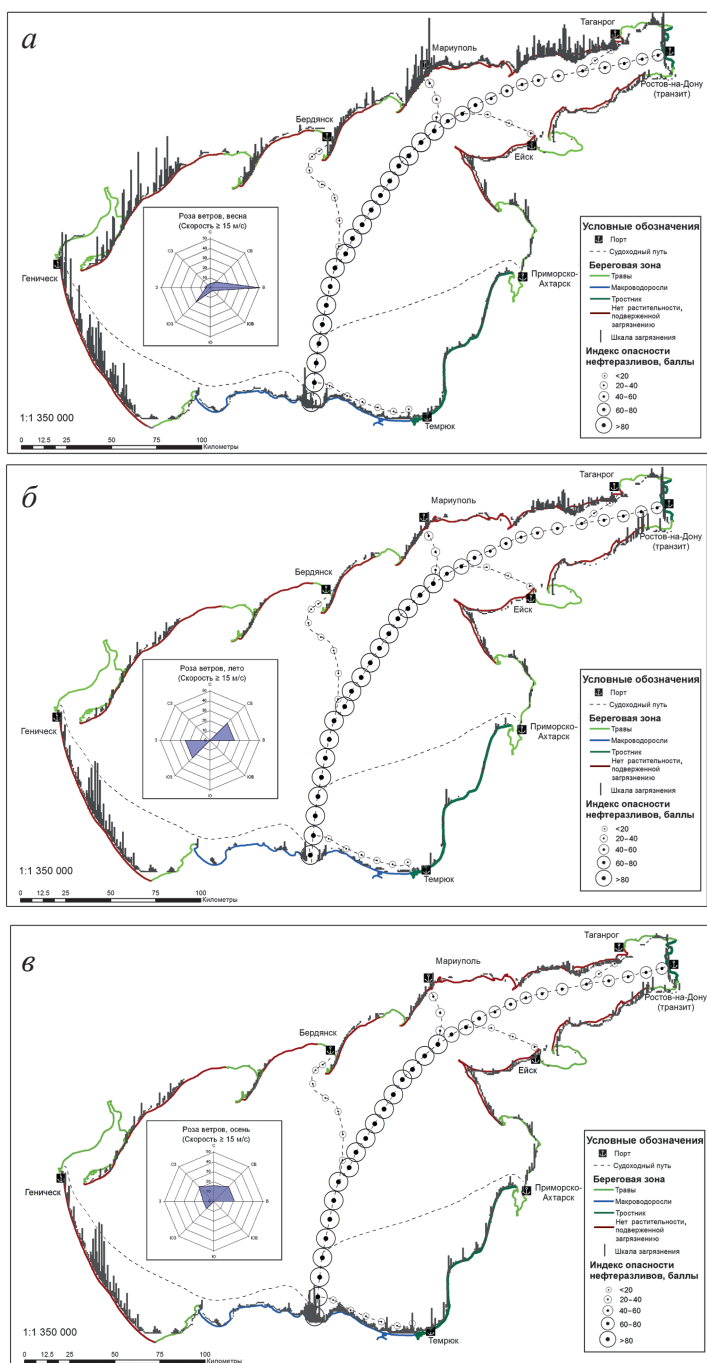


Рис. 4. Оценка риска загрязнения береговой зоны Азовского моря при аварийных разливах нефтепродуктов: *a* – весна; *b* – лето; *v* – осень

Путем суммирования загрязнений по типам береговой зоны были получены интегральные доли (вероятности) загрязнения участков с разным типом растительности по сезонам (табл. 2).

Таблица 2. Вероятность загрязнения береговой зоны Азовского моря, %

Участки граничной области		Сезон			
		Весна	Лето	Осень	Год
Береговая зона	Травы	6	9	8	7
	Макроводоросли	7	5	16	10
	Тростник	5	13	14	10
	Отсутствие подверженной загрязнению растительности	80	72	57	70
Керченский пролив		2	1	5	3

Заключение

Для оценки возможного загрязнения акватории и береговой зоны Азовского моря в случае аварийных ситуаций при морской транспортировке нефтеуглеводородов используется модельный подход к прогнозированию распространения и эволюции нефти в морской среде. Предлагаемая модель учитывает следующие процессы, происходящие с нефтью: растекание, перемещение под действием течений и ветра, волновое воздействие вблизи береговой линии, испарение, растворение нефти в воде.

Численные эксперименты проводятся в соответствии со сформированными сценариями, связанными с условиями разлива нефти и сопутствующей гидрометеорологической ситуацией.

Применение метода разделения пятна на элементарные частицы дает возможность оценить количество нефтепродуктов на конкретных участках акватории и береговой линии и выполнять моделирование разливов больших объемов. Сценарный подход позволяет проводить многовариантный ситуационный анализ исследуемой системы, где сценарий является некоторой оценкой возможного развития ситуации.

Благодарности

Публикация подготовлена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН, № госрегистрации проекта 01201363188. Авторы благодарят О.В. Степаньяна за предоставление районирования береговой зоны Азовского моря по типу преобладающей водной растительности; П.А. Бирюкова за создание ГИС-проекта, позволяющего визуализировать результаты моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Антонченков В.П. Формула для расчета ДНП узких нефтяных фракций // Химия и технология топлив и масел. 1994. № 9 (10). С. 16.

Бирюков П.А. Моделирование нефтяных разливов и оценки возможного загрязнения береговой зоны // Интегрированное управление ресурсами и безопасностью в бассейне Азовского моря: монография / под ред. Б.В. Буркинського, В.Н. Степанова (Украина), С.В. Бердникова (Российская Федерация). Одесса: ИПРЭЭ НАН Украины, 2010. С. 150–158.

Бирюков П.А., Бердникова С.В., Сурков Ф.А. ГИС-ориентированный подход к моделированию разливов нефтепродуктов в Баренцевом море // Геоинформатика. 2011. № 1. С. 10–16.

Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. V. Азовское море / под ред. Н.П. Гоптарева. СПб.: Гидрометеоиздат, 1991. 234 с.

Зуев А.Н., Ильин Г.В. Оценка вероятности загрязнения акватории и побережья юго-восточной части Баренцева моря при разливе нефти в районе Приразломного месторождения // Экосистемы, биоресурсы и антропогенное загрязнение Печорского моря / КНЦ РАН. Апатиты, 1996. С. 136–145.

Мановян А.К. Технологии первичной переработки нефти и природного газа. М.: Химия, 2001. 568 с.

Степаньян О.В., Кулыгин В.В. Влияние разливов нефти на прибрежно-водные и водные растения Азовского моря: модельный эксперимент // Вестник КамчатГТУ. 2018. № 46. С. 114–122. DOI: 10.17217/2079-0333-2018-46-114-122.

Чикин А.Л. Двухслойная математическая модель ветровых течений в водоемах, имеющих большие площади мелководья // Математическое моделирование. 2009. Т. 21. № 12. С. 152–160.

Эколого-экономические проблемы Азовского моря / [под ред. Б.В. Буркинського, В.Н. Степанова, С.В. Бердникова]. Одесса: Феникс, 2009. 532 с.

Apai D. Honours thesis for bachelor of engineering. Department of environmental engineering the University of Western Australia, 2001. 101 p.

Berdnikov S.V., Dashkevich L.V., Kulygin V.V., Sheverdyayev I.V., Tretyakova I.A., Yaitskaya N.A. EX-MARE – forecasting system of natural hazards in the Azov Sea region // Geography, Environment, Sustainability. 2018. Т. 11. № 2. С. 29–45.

Buchanan I., Hurford N. Report of the forties fate trial // Report No LR 671 (OP). 1988. Fate of marine oil spills // ITOPF. Technical information paper №2, 2002.

Fay J.A. Physical processes in the spread of oil on a water surface // Proceeding of the Joint Conference on Prevention and Control of Oil Spills. Washington, DC, American Petroleum Institut, 1971. P. 117–125.

Mackay D. Physical-chemical Weathering of Petroleum Hydrocarbons from the Ixtoc I Blow Out – Chemical Measurements and a Weathering Model // Proceedings of 1981 Oil Spill Conference, American Petroleum Institute, Washington, D.C., 1981. P. 453–460.

Mackay D., Leinonen P.J. Mathematical Model of the Behaviour of Oil Spills on Water with Natural and Chemical Dispersion // Report. EPS-3-EC-77-17. Environment Canada. 1977. Ottawa, Canada.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Бердников Сергей Владимирович – д.г.н., председатель ЮНЦ РАН, berdnikov@ssc-ras.ru

Кулыгин Валерий Валерьевич – к.т.н., зав. лаб. ЮНЦ РАН, kulygin@ssc-ras.ru