

## Разработка методов сценарного моделирования загрязнения акватории, береговой зоны и районов кромки льда Баренцева моря при аварийных разливах в районах шельфовой добычи и морской транспортировки нефти и нефтепродуктов

Для оценки возможного загрязнения акватории, береговой зоны и районов кромки льда Баренцева моря в случае аварийных ситуаций в районах шельфовой добычи и морской транспортировки углеводородов за основу взят подход к прогнозированию распространения и эволюции нефти в морской среде [1]. В настоящем проекте модель распространения и эволюции нефти в морской среде была расширена за счет учета процессов испарения и растворения. Далее дается описание предлагаемого метода сценарного моделирования,

После поступления нефти в морскую среду ее трансформация во времени и пространстве определяется рядом физических, химических и биологических процессов, которые представлены в соответствии с рисунком 1 по [2] с изменениями.

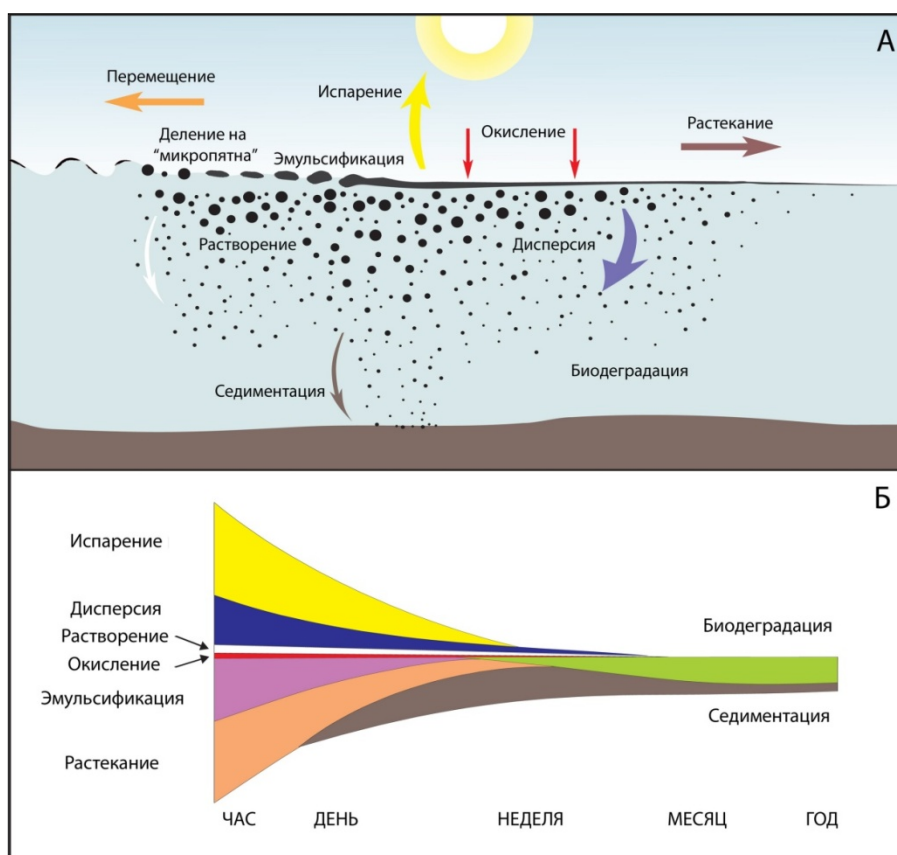


Рисунок 1 – Процессы, определяющие «судьбу» нефти в море (А) и схематическое представление их влияния на трансформацию нефти во времени (Б)

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 в разливе претерпевают изменения, связанные с различными физическими процессами, которые

вливают на нефть. 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 ( $\text{м}^3$ ),  $A_t$  - площадь его поверхности ( $\text{м}^2$ ) и  $H_t$  - его толщина ( $\text{м}$ ) в момент времени  $t$ , тогда обновление объема имеет вид (1):

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

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

После обновления объема пятна, его площадь также обновляется на каждом шаге с использованием полуэмпирических формул растекания (см. ниже) (2). Новая толщина пятна вычисляется:

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

Предполагается, что при достижении толщины  $H_t$  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 вид:

а) растекание нефти и ее перенос в консолидированном состоянии в течение определенного времени  $[0; T_1]$ ;

б) деление пятна на отдельные фрагменты, «микропятна» в момент времени  $T_1$ ;

в) перемещение отдельных фрагментов – частиц - под действием течений и ветра на отрезке времени  $[T_1; T_2]$ ;

г) учет влияния берега на перемещение «микропятен» (по мере приближения к берегу).

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, что показано в соответствии с рисунком 2, размеры которого зависят от характера процесса растекания в интервале времени  $[0; T_1]$ .

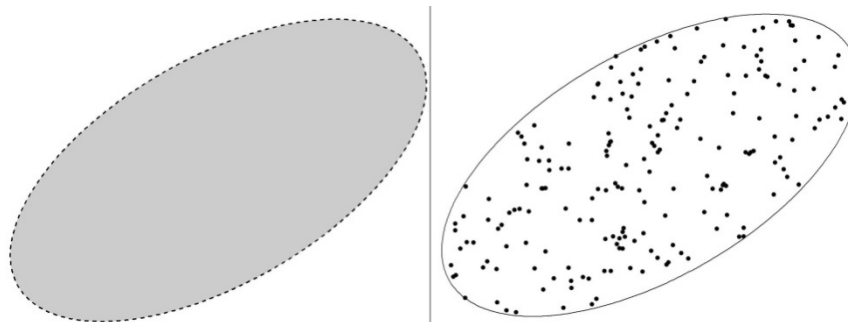


Рисунок 2 — Пример консолидированного пятна нефти через час после разлива (слева) и его распределение случайным образом на «микротяна» (справа)

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

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 натуральных экспериментов полуэмпирическими формулами Дж. Фея [3] в модификации [4] (3–5).

Диаметр пятна в направлении перпендикулярном направлению ветра ( $R_y$ , м):

$$\begin{aligned} R_y &= \alpha \sigma (V_0)^b t^c, \\ \sigma &= [(\rho_w - \rho_0) / \rho_0]^a, \end{aligned} \tag{3}$$

где  $\rho_w$  и  $\rho_0$  - плотность морской воды и нефти ( $\text{г/см}^3$ );  $V_0$  - объем первоначального разлива ( $\text{м}^3$ );  $t$  - время (минуты);  $\alpha=42.5$ ;  $a=1/3$ ;  $b=1/3$ ;  $c=1/4$ .

Диаметр пятна нефти в направлении ветра ( $R_x$ , м):

$$R_x = R_y + \beta W^d t^e, \tag{4}$$

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. Дрейф в направлении ветра определяется его скоростью и коэффициентом влияния, который изменяется в пределах 2-4 % (наиболее вероятные значения лежат в интервале 3-3.5 %). Влияние скорости течений оценивается как 100 %. Для расчета траектории центра пятна дрейфующей нефти используется подход, предложенный в [4], на основе схемы переменных ускорений, имеющей третий порядок точности по времени (6) – (7):

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

где  $X_t$  - вектор координат центра «микропятна»,  $V_t$  - вектор скорости смещения центра «микропятна»,  $\Delta t$  - шаг расчета по времени.

При этом

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

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 принят равным  $k_u=1.0$ ;  $k_s$  - коэффициент влияния берега, зависящий от расстояния до береговой линии  $L$ .

В рамках данной 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 (тип побережья, кромка льда). Типы побережья представлены в таблице 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
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 (8) [5]:

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

где  $\Delta N_{Ei}$  – 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, м<sup>2</sup>;  $\Delta t$  – 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 (9) [6]:

$$K_e = 0.0025W^{0.78}, \quad (9)$$

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 (10) [7]:

$$M_i = 60 + 0.3(T_i - 273.15) + 0.001(T_i - 273.15), \quad (10)$$

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 (11) [8]:

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

$$A = 2.9 + \alpha_1 T_i - \alpha_2 M_i + \alpha_3 T_i M_i, \quad (11)$$

$$B = 10 + \frac{\alpha_4}{T_i} + \frac{T_w}{M_i^2},$$

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/см<sup>2</sup>;  $T_w$  – температура воды, К.

Итоговый объем испарившейся нефти на шаге  $t$  равен (12):

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

где  $\Delta V_t^{(e)}$  – объем испарившейся нефти, м<sup>3</sup>;  $\Delta N_{Ei}$  – изменение количества вещества компонента с номером  $i$  за счет испарения, моль;  $M_i$  – молярная масса компонента с номером  $i$ , г/моль;  $\rho_o$  – плотность нефти (г/м<sup>3</sup>).

*Растворение.* Некоторые из компонентов, входящих в состав нефти, подвержены как испарению, так и растворению в воде. Основное влияние на силу 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 (13) [9]:

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

где:  $\Delta N_{D_i}$  – 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/м<sup>3</sup>.

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 (14) [10]:

$$S = S_0 e^{-0.1t}, \quad (14)$$

где  $S_0$  – начальная растворимость нефти, г/м<sup>3</sup>.

Итоговый объем растворившейся на шаге  $t$  нефти рассчитывается по формуле аналогичной 12.

Сценарное моделирование загрязнения акватории, береговой зоны и кромки льда Баренцева моря заключается в подготовке сценариев гипотетических аварий при добыче на шельфе или при морской транспортировке нефти и нефтепродуктов и последующей оценке зоны загрязнения.

В состав сценария входит информация о нефтеразливе и сопутствующей гидрометеорологической ситуации.

Для определения условий гипотетической аварии задаются следующие параметры:

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

В качестве входных данных используется следующая информация:

- батиметрия Баренцева моря;
- поле ветра над акваторией;

- информация о течениях;
- информация о ледовой обстановке.

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

Описание входных данных модели представлено ниже.

*Метеорологическая обстановка.* В качестве данных о метеорологической обстановке планируется использовать данные модели HIRLAM (High Resolution Limited Area Model) (<http://met.no>).

*Информация о течениях.* В качестве полей поверхностных течений для Баренцева моря будут использованы результаты гидродинамической модели TOPAZ-4, которая базируется на уравнениях модели общей циркуляции океана (Ocean General Circulation Model), а именно модели Hybrid Coordinate Ocean Model (HYCOM) (<http://topaz.nersc.no>). Пространственный шаг сетки течений – 12.5 км.

*Ледовая обстановка.* В качестве сценариев ледовой обстановки в Баренцевом море планируется использование данных Национального ледового центра (the National Ice Center) NOAA, представляющие собой карты распространения снега и льда в северном полушарии на основе спутниковых наблюдений.

Расчетная сетка модели для сценарного моделирования загрязнения акватории, береговой зоны и районов кромки льда Баренцева соответствует сетки течений из системы TOPAZ.

Для исследования рисков загрязнения Баренцева моря в случае аварий при транспортировке нефтепродуктов используется следующий подход. Определяются все основные маршруты транспортировки. 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, береговой линии и кромки льда Баренцева моря. Каждый численный эксперимент представляет собой залповый сброс нефти на одном из выделенных участков. В результате серии экспериментов могут быть получены вероятностные карты загрязнения береговой зоны и акватории для соответствующих сезонов.

В ходе выполнения работ была использована инфраструктура Центра коллективного пользования (ЦКП) «Высокопроизводительные вычисления». На Linux-кластере (IBM Cluster 1350), состоящем из 13 вычислительных узлов, соединенных скоростной коммуникационной сетью DDR Infiniband, были проведены тестовые расчеты прототипа реализации модели распространения и эволюции нефти в морской среде.



Для расчета был выбран гипотетический сценарий нефтеразлива в Баренцевом море. В ходе расчетов выполнялась вариация параметров сценария. Пример траекторий движения нефти, полученных по модели, представлен в соответствии с рисунком 3.



Рисунок 3 — Пример расчета траектории движения пятен нефти в Баренцевом море

Прирост производительности по времени выполнения при использовании кластера по сравнению с персональным компьютером в среднем составил 11 %.

По результатам тестовых расчетов специалистами ЦКП был сформулирован ряд технических требований к разрабатываемым методам, предъявляемых вычислительными ресурсами ЦКП, и даны рекомендации по программной реализации модели. Основная модификация касается распараллеливания участка программы, связанного с описанием движения частиц после их образования из консолидированного пятна нефти.

Метод сценарного моделирования загрязнения акватории, береговой зоны и районов кромки льда Баренцева моря при аварийных разливах в районах шельфовой добычи и морской транспортировки нефти и нефтепродуктов основан на модельном подходе к прогнозированию

распространения и эволюции нефти в морской среде. При разработке метода были выполнены следующие работы:

- разработана математическая модель распространения и эволюции нефти в морской среде;
- выполнен анализ литературы и выбраны параметризации процессов, учитываемых моделью, таких как испарение и растворение нефти;
- введена классификация типа береговой зоны для оценки величины нефти, остающейся на берегу;
- сформулирован состав сценария для выполнения имитационных экспериментов;
- осуществлен поиск источников входных данных для формирования сценариев;
- разработан подход к оценке рисков загрязнения Баренцева моря в случае аварий при транспортировке нефтепродуктов, заключающийся в разбиении существующих путей транспортировки грузов на участки и проведения серии расчетов для каждого из участков;
- проведены тестовые расчеты в ЦКП, позволившие сформулировать рекомендации для программной реализации моделей.

*Работа выполнена в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы», проекта «Разработка методов экосистемного мониторинга заливов и шельфа Баренцева моря и высокоширотной Арктики, сценарного моделирования аварийных ситуаций при транспортировке нефтепродуктов и радиоактивных отходов и экспериментальных технологий их защиты от загрязнения в условиях морского перигляциала» (Уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI61616X0073, Соглашение № 14.616.21.0073 от 28.07.2016г.)*

## Литература

1. Бирюков П.А., Бердников С.В., Сурков Ф.А. ГИС-ориентированный подход к моделированию разливов нефтепродуктов в Баренцевом море / П.А. Бирюков, С.В. Бердников, Ф.А. Сурков // Геоинформатика. - 2011.- № 1. - С. 10-16.
2. Fate of marine oil spills // ИТОПФ. Technical information paper.- London, 2002.-№2.
3. Fay J.A. Physical processes in the spread of oil on a water surface / J.A. Fay // Proceeding of the Joint Conference on Prevention and Control of Oil Spills. -Washington, DC, American Petroleum Institut, 1971. – P. 117-125.
4. Зуев А.Н. Оценка вероятности загрязнения акватории и побережья юго-восточной части Баренцева моря при разливе нефти в районе Приразломного месторождения / А.Н. Зуев , Г.В. Ильин // Экосистемы, биоресурсы и антропогенное загрязнение Печорского моря. – Апатиты: КНЦ РАН, 1996. -С. 136-145.
5. Mackay D. Mathematical Model of the Behaviour of Oil Spills on Water with Natural and Chemical Dispersion / D. Mackay, P.J. Leinonen // Report. EPS-3-EC-77-17.Environment Canada.-Ottawa, Canada.1977.
6. Buchanan I. Report of the forties fate trial / I. Buchanan, N. Hurford // Report № LR 671 (OP). - 1988.
7. Мановян А.К. Технологии первичной переработки нефти и природного газа / А.К. Мановян - М.: Химия, 2001.- 568 с.
8. Антонченков В.П. Формула для расчета ДНП узких нефтяных фракций / В.П. Антонченков // Химия и технология топлив и масел. - 1994.- № 9 (10). -С.16.
9. Mackay D. Physical-chemical Weathering of Petroleum Hydrocarbons from the Ixtoc I Blow Out – Chemical Measurements and a Weathering Model / D. Mackay // Proceedings of 1981 Oil Spill Conference.- Washington, D.C., American Petroleum Institute, 1981. -P. 453-460.
10. Apai D. Honours thesis for bachelor of engineering. / D. Apai.- Department of environmental engineering the University of Western Australia, 2001. - 101 p.