

Математическое моделирование морских систем

УДК 551.46.072

С.К. Коновалов, С.Г. Демышев, А.С. Запевалов

Математическое моделирование распределения нефтяных углеводородов в аэробных и анаэробных водах Черного моря

Уточнен и дополнен набор параметризаций химико-биологических процессов ассимиляции эмульсионно-растворенной фракции нефтяных углеводородов (НУ) в морской среде с учетом окислительно-восстановительных условий в окислительной, аэробной, субкислородной и анаэробной зонах Черного моря. Выполнены численные эксперименты с целью восстановления вертикального и пространственного распределения НУ. Увеличение с трех до пяти числа рассматриваемых фракций НУ, учет влияния концентрации кислорода и включение в рассмотрение процессов анаэробного и фотохимического окисления НУ позволили построить численную модель распределения НУ в аэробных и анаэробных водах моря и добиться количественного соответствия между результатами численных экспериментов и экспедиционных наблюдений.

Введение

Нефтяные углеводороды являются основным типом антропогенных загрязняющих веществ, поступающих в воды Мирового океана, в том числе Черного моря. Общее годовое поступление (при отсутствии аварий) НУ в Черное море из береговых источников и в результате технологического загрязнения с судов оценивается в 110 – 130 тыс. тонн [1]. Сравнение опубликованных данных по общему годовому поступлению [1] и скорости химико-биологического окисления НУ в морской воде [2] показывает, что ассимиляционный потенциал моря в отношении этого типа загрязняющих веществ близок к исчерпанию. Одним из подтверждений является следующий факт: в 70-е и 80-е годы, когда общее поступление НУ было еще выше, их среднее содержание в поверхностном слое моря составляло 17,6 ПДК (предельно-допустимая концентрация) при максимальных зафиксированных величинах 77 ПДК [3, 4]. Авария на современном нефтеналивном танкере может привести к многократному увеличению поступления в первую очередь тяжелых фракций НУ в Черное море, что приведет к катастрофическим последствиям. По этой причине создание математических моделей переноса и химико-биологического окисления НУ является актуальным, поскольку позволит оценить и минимизировать ущерб от загрязнения.

Дополнительная особенность Черного моря состоит в том, что его воды, начиная с глубин 100 – 250 м, содержат сероводород при отсутствии кислорода. Традиционно рассматриваемые и исследуемые процессы разрушения НУ в морской воде предполагают химическое, фотохимическое и биологиче-

ское окисление углеводов кислородом. Поэтому такие процессы характерны лишь для верхнего аэробного слоя. Пример параметризации и численного моделирования сезонного хода распределения НУ в аэробной зоне представлен в [5]. В работе предложены параметризации химико-биологических процессов ассимиляции НУ, которые позволили дополнить модель Демьшева — Коротаева [6] и качественно правильно описать основные особенности пространственного распределения НУ в различные сезоны года. Основным недостатком этой и других работ состоит в том, что рассматриваются лишь процессы ассимиляции НУ в аэробных условиях.

Отсутствие кислорода не является, как это может показаться на первый взгляд, условием консервации и предотвращения ассимиляции НУ в морской среде. Процессы анаэробного разрушения соединений органического углерода протекают не менее эффективно, чем окисление кислородом, хотя и с меньшей скоростью. Главным отличием анаэробного окисления НУ от аэробного является то, что в качестве побочного продукта образуется сероводород. Таким образом, поступление НУ в воды Черного моря приводит не только к традиционным для других районов Мирового океана экологическим проблемам, но и к специфическим для Черного моря проблемам дополнительной продукции сероводорода.

Значительное время обновления вод анаэробной зоны моря, составляющее десятки и сотни лет, должно приводить к полной утилизации НУ и их уменьшению с глубиной вплоть до полного исчезновения. Однако экспедиционные данные о вертикальном распределении НУ [4] показывают наличие их значительных концентраций в глубинных водах моря, что порождает дополнительные вопросы о процессах ассимиляции НУ в анаэробных морских системах.

Цель данной работы — развитие предложенного ранее [5] набора параметризаций химико-биологических процессов утилизации эмульсионно-растворенной фракции НУ в морской среде с учетом существенных изменений вплоть до полного исчезновения кислорода и появления сероводорода в глубинных водах Черного моря; выполнение численных экспериментов с целью восстановления вертикального и пространственного распределения НУ во всей толще вод.

Методы расчета

Гидродинамическая модель Черного моря. Для расчета сезонной эволюции циркуляции и термохалинной структуры вод моря использовалась трехмерная нелинейная модель [6], основанная на полных уравнениях гидротермодинамики.

При адаптации численной модели к условиям Черного моря [7] весь его объем был разбит на боксы с горизонтальными размерами $14,8 \times 14,8$ км. По вертикали задан неравномерный шаг. Были выбраны 44 горизонта (2,5, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 75, 90, 105, 120, 145, 170, 200, 250, ..., 700, 800, ..., 1900, 1950, 1975, 1985, 1995, 2000 м). В узлах сетки на этих горизонтах вычислялись величины температуры, солёности и вектора течения. Шаг по времени составлял 10 мин.

Коэффициенты турбулентной вязкости и диффузии по вертикали и горизонтали и краевые условия были взяты из работы [8], задавались тангенциальное напряжение трения ветра и потоки тепла и соли, причем диффузионный поток соли был пропорционален разности между осадками и испарением.

На твердых боковых границах ставились условия непротекания и отсутствия потоков тепла и соли. На жидких участках границы, где втекают реки и нижнебосфорское течение, ставились условия Дирихле для температуры, солености и горизонтальной скорости [8].

Воды, вносимые нижнебосфорским течением, имели соленость 35‰ и температуру 16°C, что соответствует характеристикам вод Мраморного моря. Для верхнебосфорского течения и в случае втока вод через Керченский пролив для горизонтальной скорости ставилось условие Дирихле.

Для температуры и солености использовались условия изоляции: $\partial T / \partial x = \partial S / \partial x = 0$ — на меридиональных и $\partial T / \partial y = \partial S / \partial y = 0$ — на зональных участках. На дне принималось условие прилипания и отсутствия потоков тепла и соли.

Рассмотрены два варианта построения полей течений. В первом варианте поле трехмерной скорости строилось на основе последовательного усвоения климатических полей температуры и солености в численной гидродинамической модели Черного моря [8]. Процедура усвоения осуществлялась на каждом шаге по времени. Результаты предварительного анализа полей концентрации нефти показали, что в этом варианте достаточно хорошо описывается горизонтальный перенос, однако вертикальные скорости в глубинных слоях имеют слишком высокие значения. В результате нефтяное загрязнение, поступающее в верхние слои, очень быстро (за несколько лет) проникает до дна в глубоководной части моря, а придонные воды также быстро поступают в верхние слои. Подобные большие вертикальные скорости не соответствуют существующим в настоящее время косвенным оценкам вертикального обмена в Черном море.

Во втором варианте использовалось поле течений, полученное в результате гидродинамического прогноза гидрофизических полей Черного моря [8]. Отличие от предыдущего эксперимента заключалось в отсутствии ассимиляционных слагаемых в уравнениях модели. В качестве начальных условий использовались климатические поля температуры и солености, эксперимент проводился на 20 лет модельного времени. Тем самым гидродинамическая структура вод формировалась под влиянием краевых условий. Модель достаточно хорошо воспроизводит основные гидрологические характеристики Черного моря, включая холодный промежуточный слой (рис. 1). В этом расчете получены более реалистичные оценки вертикальных скоростей. Результаты расчетов за последний год модельного времени использовались как входные данные в модели распространения нефтяного загрязнения.

Моделирование распространения нефтяного загрязнения проводилось на основе четырехмерного поля климатических скоростей. Для расчета скорости разложения использовались поля температуры и солёности, полученные в рамках той же гидродинамической модели, в которой рассчитывалось поле скоростей. Такой подход позволил использовать для расчета концентрации загрязнения гидродинамически согласованные поля температуры, солёности

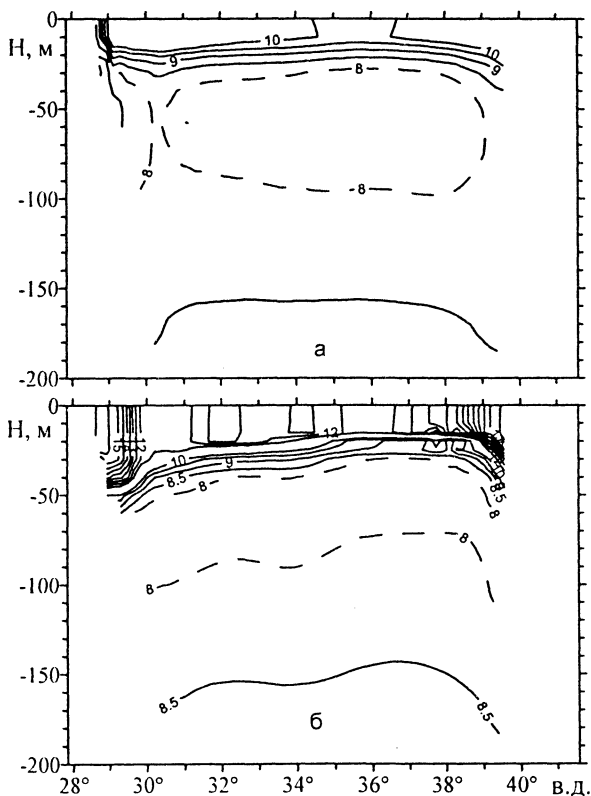
и течений. Климатические поля гидрофизических параметров построены на период времени, равный одному году, с интервалом 5 сут. Далее гидрофизические поля использовались как входные данные для модели распространения загрязнения, для этого они интерполировались на каждый шаг модельного времени.

При моделировании физических процессов переноса НУ предполагалось, что их концентрация относительно невысока и они не оказывают влияния на физические характеристики морской среды. Кроме того, предполагалось по аналогии с [5], что общее содержание НУ определяется суммой индивидуальных фракций, взаимные переходы между которыми в модели не рассматривались.

В общем виде распространение каждой фракции в водной среде описывалось уравнением

$$\frac{\partial C_k}{\partial t} + \frac{\partial C_k u}{\partial x} + \frac{\partial C_k v}{\partial y} + \frac{\partial C_k w}{\partial z} = D + R_k, \quad (1)$$

где C_k – концентрация k -й фракции нефти; u, v, w – компоненты вектора скорости течений в прямоугольной системе координат $\vec{x} = (x, y, z)$, оси которой направлены соответственно на восток, север и вертикально вниз; D – турбулентная диффузия; R_k – член, описывающий разложение данной фракции нефти за счет процессов химического и биологического окисления.



Р и с. 1. Распределение температуры (°C) по результатам математического моделирования на разрезе по 43.7° с. ш. в весенний (а) и осенний (б) сезоны (штриховая линия соответствует изотерме 8 °C – границе ХПС)

Параметризации химико-биологических процессов ассимиляции нефтяных углеводородов в аэробных и анаэробных водах. Данная работа направлена на развитие модели трансформации НУ в морской воде, предложенной в [5], где предполагалось, что общее содержание НУ определяется суммой трех фракций: легкой, средней и тяжелой. Для каждой из этих фракций учитывались химические и биологические процессы окисления. Ассимиляция отдельных фракций характеризовалась различными величинами удельной скорости окисления и различным влиянием температуры на константы скорости химического и биологического окисления. В общем случае скорость окисления (R_k) k -й фракции НУ имеет вид

$$R_k = \mu_k C_k, \quad (2)$$

где μ_k — константа скорости окисления k -й фракции НУ в результате химических и биологических процессов, которая описывается следующим образом:

$$\mu_k = \frac{\ln 2}{\tilde{t}_k - a_k n}, \quad (3)$$

здесь $\tilde{t}_k$ — период времени, в течение которого химически окисляется 50% исходного количества k -й фракции НУ, $a_k n$ определяет влияние микробиологических процессов на скорость окисления k -й фракции НУ.

Влияние температуры на скорость окисления НУ описывалось уравнением Аррениуса, применимость которого подтверждается данными работы [9]. В общем виде

$$\tilde{t}_k = \tilde{t}_k^{T_0} A^{\frac{T_0 - T}{10}}, \quad a_k = a_k^{T_0} B^{\frac{T_0 - T}{10}}, \quad (4)$$

где T — температура воды; T_0 — температура воды, для которой известны величины $\tilde{t}_k^{T_0}$ и $a_k^{T_0}$; A и B — коэффициенты температурной зависимости удельной скорости химического и биологического окисления НУ.

В настоящей работе дополнительно учтено влияние существенного изменения содержания кислорода в водах Черного моря, а также наличие сероводородной зоны, где кислород отсутствует. Кислород расходуется в процессе окисления НУ, причем на окисление 1 кг нефти требуется до 3,5 кг кислорода. Этот факт, как правило, не учитывается в используемых моделях, поскольку рассматривается лишь поверхностный и верхний перемешанный слой, где содержание кислорода всегда близко к насыщению. Вместе с тем соотношение (2) выполняется с достаточной степенью точности лишь при условии постоянства концентрации кислорода, поскольку в общем виде это соотношение выглядит следующим образом:

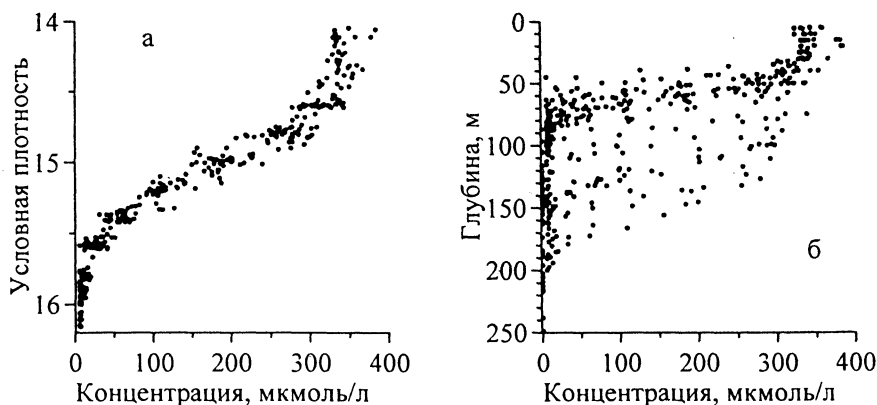
$$R_k = \mu_k^* C_k C_{O_2}, \quad (5)$$

где C_{O_2} — концентрация кислорода, $\mu_k = \mu_k^* C_{O_2} \sim \text{const}$ при условии, что $C_{O_2} \sim \text{const}$.

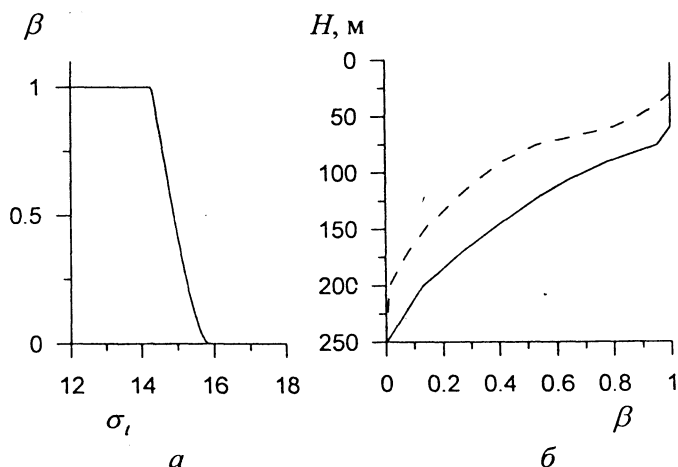
Поскольку данные по содержанию кислорода в модели отсутствуют, его влияние учитывалось путем использования регрессионной зависимости нормированного вертикального распределения кислорода от величины условной плотности воды. Известно, что вертикальное распределение кислорода в Черном море [10] носит изопикнический характер и близкие величины концентрации кислорода наблюдаются на горизонтах с близкими величинами условной плотности воды, а не глубины (рис. 2). Независимо от характера циркуляции и динамики вод зависимость содержания кислорода в слое $14,3 < \sigma_t < 16,0$ может быть описана следующим уравнением (рис. 3, а):

$$\beta = -525,96 + 109,54\sigma_t - 7,53\sigma_t^2 + 0,1715\sigma_t^3, \quad (6)$$

где σ_t — величина условной плотности воды в узле расчетной сетки; β — отношение концентрации кислорода к его содержанию в верхнем перемешанном слое, которое принимается равным 1 при $\sigma_t < 14,3$ и 0 — при $\sigma_t > 16,0$.



Р и с. 2. Распределение кислорода в водах Черного моря относительно плотности (а) и глубины (б) по данным 30-го рейса НИС «Профессор Колесников» в апреле 1993 г.



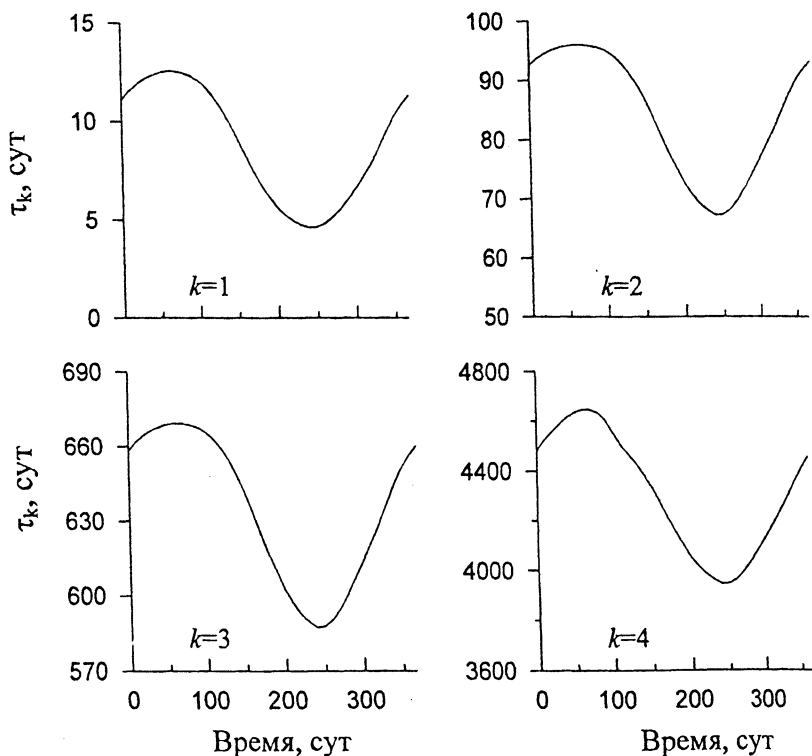
Р и с. 3. Распределение параметра β (содержание кислорода, нормированного на его концентрацию в поверхностном слое) относительно условной плотности — а и глубины — б (штриховая линия характеризует распределение в центральной части циклонических круговоротов, сплошная — в области антициклонических круговоротов на периферии глубоководной части моря)

Соотношение (5) принимает вид

$$R_k = \mu_k^{**} \beta C_k, \quad (7)$$

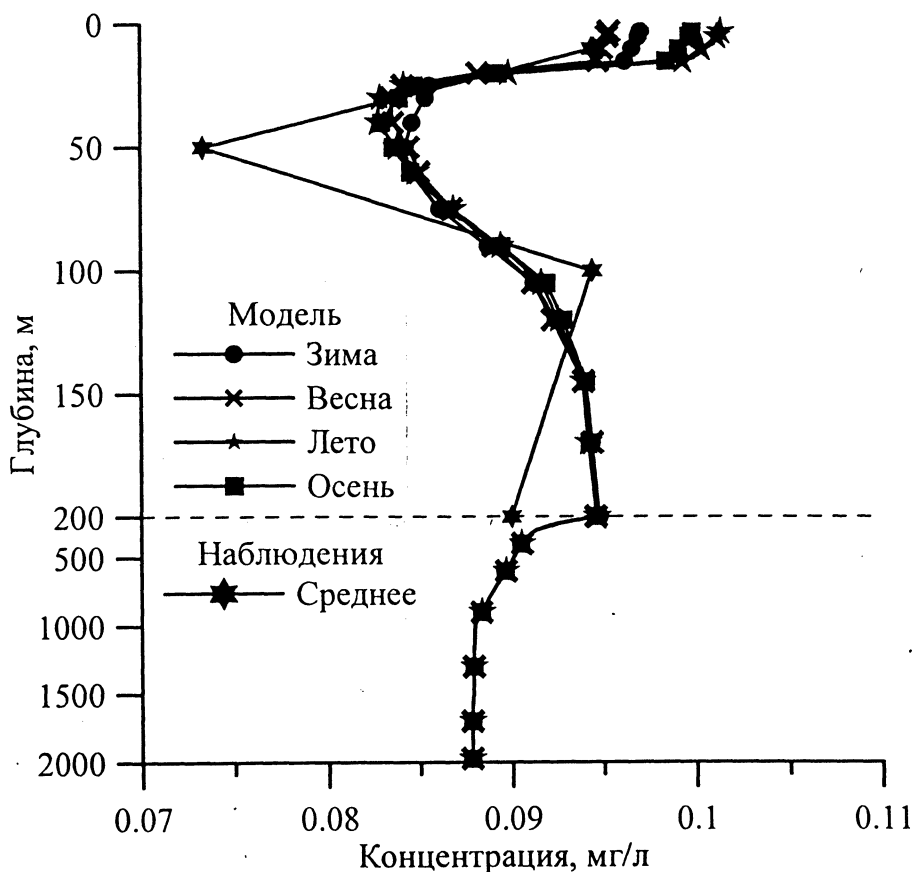
где $\mu_k^{**} = \mu_k^* C_{O_2}^{\text{поверхн}}$.

Такой способ параметризации влияния содержания кислорода на скорость окисления НУ позволяет учесть особенности вертикального распределения кислорода в зависимости от динамики и термохалинной стратификации вод (рис. 3, б). В районах циклонических круговоротов, где основной пикноклин и оксиклин расположены ближе к поверхности моря, величина β уменьшается и достигает нулевых значений на меньших глубинах. В поверхностном слое вод, где содержание кислорода близко к насыщению, т. е. величина β близка к 1, время, за которое окисляется половина начального количества НУ, изменяется от минимальных величин в летний период до максимальных — в зимний (рис. 4). Диапазон значений τ_k существенно изменяется при переходе от одной фракции НУ к другой. Так, для первой фракции эта величина изменяется более чем в 2 раза, тогда как для четвертой фракции изменения составляют менее 15%.



Р и с. 4. Сезонные изменения характерного времени разрушения половины начального содержания индивидуальных фракций НУ в поверхностном слое

В субкислородных и анаэробных условиях, как это видно из соотношений (5) и (7), скорость окисления НУ кислородом уменьшается до нулевых значений, $R_k \rightarrow 0$ при C_{O_2} и $\beta \rightarrow 0$. Именно это объясняет факт увеличения концентраций НУ в слое 100 – 200 м (рис. 5). Тем не менее из этого не следует, что НУ в анаэробных условиях являются химически инертными и, соответственно, накапливаются в сероводородной зоне. Нефтяные углеводороды, которые представляют собой смесь различных гомологов предельных, непредельных и ароматических углеводородов, могут разрушаться нефтеокисляющими микроорганизмами за счет кислорода сульфатов. По аналогии с анаэробным окислением органического вещества в анаэробных условиях одним из конечных продуктов анаэробного окисления НУ является сероводород. Окисление НУ в анаэробных условиях, их поступление с водами нижнебосфорского течения и отсутствие их значительных источников (за исключением метана) в глубинных слоях моря объясняет характер их вертикального распределения, которое характеризуется наличием промежуточного максимума концентраций на глубинах 100 – 200 м и уменьшением содержания НУ в более глубоких водах (рис. 5).



Р и с. 5. Среднее по морю вертикальное распределение суммарного содержания НУ по модельным расчетам и по данным наблюдений

Скорость анаэробного окисления НУ описывается уравнением, аналогичным соотношению (2):

$$R_k = \mu'_k C_k, \quad (8)$$

где μ' — константа скорости окисления НУ в анаэробных условиях. Поскольку равенство (8) не предполагает ограничения скорости анаэробного окисления НУ в аэробных условиях, этот процесс учитывается лишь для слоев, где величина условной плотности больше 15,9, т. е. концентрация кислорода уменьшается до субкислородного уровня либо кислород отсутствует (рис. 2).

В отличие от работы [5] количество рассматриваемых фракций НУ увеличено с 3 до 5. Это увеличение вызвано следующими причинами. Во-первых, наиболее устойчивая третья фракция НУ характеризовалась временем, за которое происходило разрушение 50%-исходного количества вещества (600 – 900 дней), тогда как характер распределения НУ в слое основного пикноклина предполагает существование более устойчивых компонент. Кроме того, характер распределения НУ в наиболее глубоких слоях анаэробной зоны предполагает существование консервативных в анаэробных условиях компонент нефти. Существование таких соединений органического углерода является в настоящее время общепризнанным [11]. Показано, что единственным процессом, приводящим к разрушению этих соединений, является процесс их фотохимического разложения в поверхностном слое моря.

Таким образом, для параметризации процессов разрушения НУ в аэробных, субкислородных и анаэробных условиях Черного моря в настоящей работе используются соотношения (7) и (8) с учетом зависимости химических и биологических параметров от температуры (4). Данные зависимости применялись для описания химико-биологических процессов разрушения четырех фракций НУ, тогда как для пятой фракции рассматривались только процессы фотохимического разрушения в поверхностном слое. Скорость фотохимического разложения описывается аналогично соотношениям (2) и (8):

$$R_k = \mu''_k C_k, \quad (9)$$

где μ'' — константа скорости фотохимического разрушения пятой фракции НУ.

С учетом опубликованных данных и в результате многочисленных предварительных численных экспериментов были получены оценки эмпирических коэффициентов, представленные в таблице.

В работе учитывалось поступление НУ с атмосферными осадками, стоком рек и нижнебосфорским течением, а также их удаление из Черного моря с верхнебосфорским течением. Процессы обмена с Азовским морем не учитывались.

Поток НУ с атмосферными выпадениями задавался равномерным по всей акватории моря как граничное условие. Суммарное поступление за год, как и в работе [5], принималось равным 29 600 т. Сезонная изменчивость осадков не учитывалась. Предполагалось, что тяжелые фракции (четвертая и пятая) в

атмосферных выпадениях отсутствуют. Для первых трех фракций объемы поступлений задавались в соотношении 3:3:4.

**Параметры уравнений (1) – (4), описывающих характеристики
химико-биологического окисления различных фракций НУ
в водах Черного моря**

Параметры	Первая фракция	Вторая фракция	Третья фракция	Четвертая фракция	Пятая фракция
$\bar{\tau}_k$ при 20 °С	55	100	600	4000	–
a_k при 20 °С	0,05	0,03	0,005	0,001	–
A	1,5	1,5	1,1	1,1	–
B	1,45	2,0	2,0	2,0	–
μ'	0,7	0,052	0,01	0,00014	0
μ''	–	–	–	–	0,00032

Поступление НУ с речным стоком задавалось пропорциональным среднемесячному расходу рек [7] таким образом, чтобы суммарное годовое поступление было равно 130 000 т [5]. Концентрация НУ в речных водах считалась постоянной и равной 0,39 мг/л. Поступление НУ с речным стоком задавалось в форме источника, интенсивность которого пропорциональна концентрации НУ в речных водах и речному стоку. Предполагалось, что источник распределен по глубине в слое до 12,5 м (для р. Дунай до 17,5 м) и по трем прилегающим к устью реки в горизонтальной плоскости боксам. Соотношение фракций НУ задавалось как 1:2:7:0:0.

Концентрация НУ в водах нижнебосфорского течения принята равной 0,12 мг/л. При годовом поступлении мраморноморских вод, равном 300 км³, суммарное поступление нефти составляет 36 000 т. Вертикальное распределение потока НУ, поступающих с нижнебосфорским течением, задавалось в слое 60 – 200 м в соответствии с данными работы [12] и составляло 0% на глубине 60 м, 6% – на 75 м, 29% – на 90 м, 31% – на 105 м, 22% – на 120 м, 8% – на 145 м, 3% – на 170 м, 1% – на 200 м. Как и для рек, поступление НУ через Босфор задавалось в виде распределенного источника. Соотношение фракций 0:1:1:2:7.

Результаты расчетов и их обсуждение

Полученное в численных экспериментах вертикальное распределение НУ в водах моря (рис. 5) показывает возможность количественного воспроизведения наблюдаемых особенностей распределения и их сезонных изменений в рамках предложенных параметризаций физических и химико-биологических процессов. Действительно, отмечавшиеся в литературе [4] максимальные концентрации НУ в верхнем слое вод, уменьшение их содержания в слое 30 – 60 м, последующий рост на глубинах 100 – 200 м и постепенное уменьшение

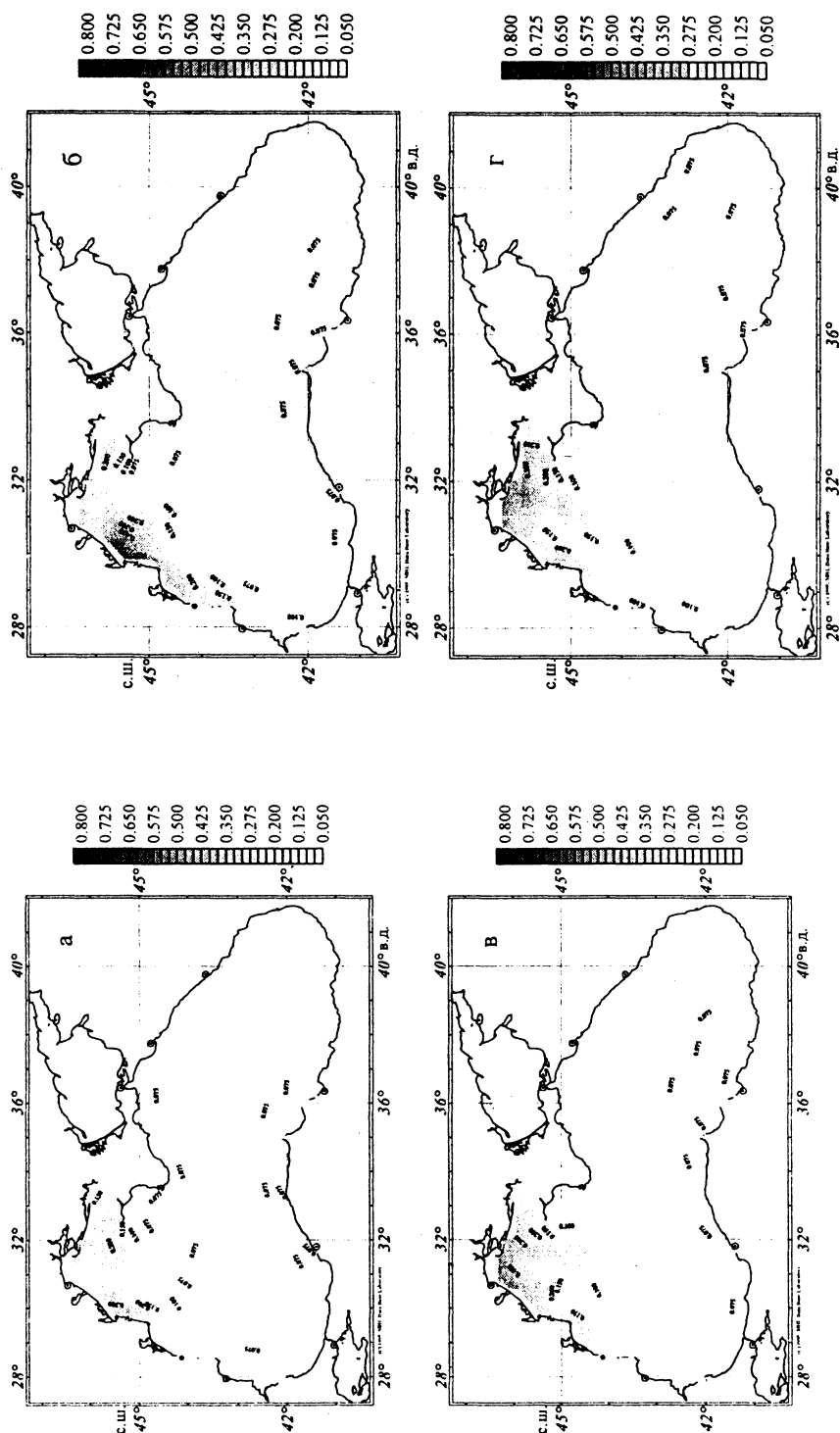
ко дну получили количественное подтверждение. Характер изменения концентраций НУ в верхнем слое вод также соответствует опубликованным данным [4]: максимальные концентрации наблюдаются на северо-западном шельфе моря и вблизи устьев рек; концентрации увеличиваются в весенний период, что связано с их поступлением с речным стоком, и уменьшаются в летне-осенний период в связи с их интенсивным химико-биологическим разрушением при высоких температурах; сезонные изменения в распределении НУ вдоль западного побережья моря определяются соотношением интенсивности переноса трансформированных вод Дуная с шельфа моря и интенсивности разрушения НУ при различных температурах.

Максимальные концентрации НУ в верхнем 30-метровом слое являются результатом того, что основное количество НУ поступает с речным стоком и атмосферными выпадениями, а интенсивность их вертикального переноса в более глубокие слои ограничена наличием сезонного пикноклина в теплый период года и основного пикноклина на протяжении всего года. В то же время именно для этого слоя характерны максимальное изменение температур при переходе от зимнего к летнему сезону, существенный диапазон сезонных изменений в поступлении НУ, максимальное насыщение вод кислородом. Сочетание этих факторов приводит к тому, что в поверхностном 30-метровом слое наблюдаются не только максимальные концентрации НУ, но и максимальные пространственные градиенты концентраций НУ, в первую очередь в районе, примыкающем к устью Дуная (рис. 6).

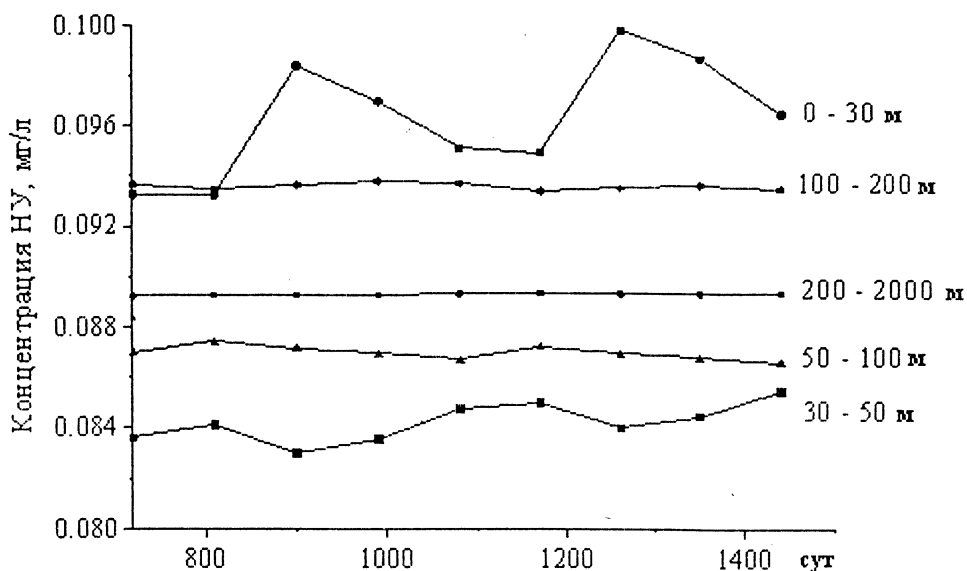
Увеличение скорости окисления НУ под влиянием повышенных температур в теплый период года и насыщения вод кислородом приводит к тому, что содержание НУ от летнего к осеннему сезону убывает, несмотря на то что сезонный пикноклин препятствует их переносу из поверхностного в более глубокие слои. Физический перенос НУ в более глубокие слои, включая ХПС, становится интенсивным в холодный период, когда процессы конвективного перемешивания приводят к разрушению сезонного пикноклина и обновлению вод ХПС. В результате концентрация НУ в поверхностном слое убывает, а в слое 30 – 60 м увеличивается. Как результат, периоды увеличения и уменьшения концентрации НУ в этих слоях противоположны (рис. 7).

Малые концентрации НУ в слое 30 – 60 м являются результатом того, что физические процессы обеспечивают относительно малое поступление углеводородов, а насыщение вод кислородом способствует протеканию достаточно интенсивных процессов их распада. Как и по данным экспедиционных наблюдений [4], этот слой характеризуется наименьшими величинами концентраций НУ.

В слое глубже 60 м (рис. 5), как и по экспедиционным данным, наблюдается рост концентраций НУ, которые достигают промежуточного максимума на глубинах 100 – 200 м. Существование этого максимума объясняется тем, что на указанных глубинах происходит поступление НУ с водами нижнебосфорского течения (рис. 8). Кроме того, предельно низкие концентрации кислорода существенно снижают скорость химико-биологического разложения НУ.

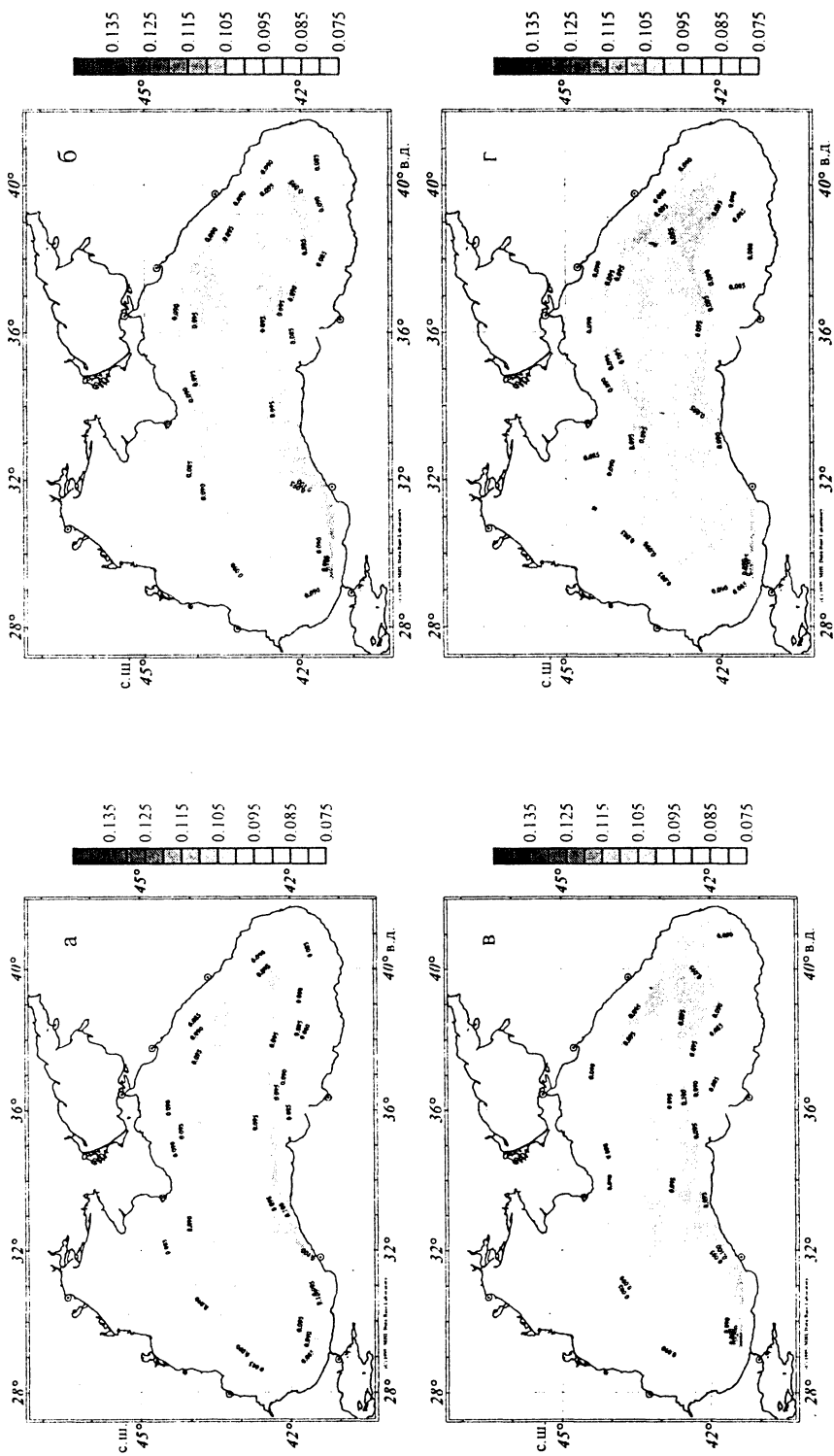


Р и с. 6. Распределение концентраций НУ по модельным расчетам на горизонте 10 м в весенний (а), летний (б), осенний (в) и зимний (г) сезоны



Р и с. 7. Сезонные изменения по модельным расчетам средних концентраций НУ в различных слоях Черного моря

В более глубоких слоях моря как по результатам численных экспериментов, так и по экспедиционным данным, отмечается слабое уменьшение концентраций НУ с глубиной. Такой характер вертикального распределения НУ объясняется тем, что направленный вниз физический поток НУ компенсируется протеканием анаэробных процессов их разложения. Вместе с тем необходимо отметить, что достаточно высокие концентрации НУ в наиболее глубоких слоях могут быть объяснены лишь существованием химически консервативной фракции НУ. Опубликованные данные о распределении органического вещества и его реакционноспособности в водах Мирового океана подтверждают существование такой фракции органического углерода, для которой единственным процессом распада является фотохимическое разложение в поверхностном слое. Именно включение в данную версию модели фракции НУ, которая устойчива в химико-биологических процессах и фотохимически разрушается в верхнем слое, позволило завершить процесс построения количественной численной модели распределения нефтяных углеводородов в аэробных и анаэробных водах Черного моря.



Р и с. 8. Распределение концентраций НУ по модельным расчетам на горизонте 105 м в весенний (а), летний (б), осенний (в) и зимний (г) сезоны

Работа выполнена в рамках международного проекта №1725 «Междисциплинарная оперативная модель прогноза последствий нефтяного загрязнения морской среды» Украинского научно-технического центра. Авторы признательны участникам проекта за обсуждение данного материала на совещаниях, а также сотрудникам МГИ НАН Украины, замечания и предложения которых способствовали улучшению работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Black Sea Transboundary Diagnostic Analysis* // The Global Environmental Facility. Black Sea Environmental Programme. Programme Coordination Unit. — Istanbul. — 1996. — P. 33.
2. *Процессы самоочищения морских вод от химических загрязнений.* — М.: Гидрометеиздат, 1978. — 152 с.
3. *Осипов Ю.С., Рябинин А.И., Пухтяр Л.Д.* Исследование загрязнения вод Черного моря // *Гидрофизические и гидрохимические исследования в Черном море.* — Севастополь: МГИ АН УССР, 1984. — С. 63 – 133.
4. *Рябинин А.И., Губанов В.И., Клименко Н.П., Назаренко С.А.* Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. IV. Черное море. Выпуск 3. Современное состояние загрязнения вод Черного моря / Под ред. А.И. Симонова, А.И. Рябинина. — Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 1996. — 230 с.
5. *Коновалов С.К., Кубряков А.И., Демьшев С.Г.* Параметризация химико-биологических процессов окисления и численное моделирование сезонного хода распределения нефтяных углеводородов в аэробной зоне Черного моря // *Морской гидрофизический журнал.* — 2004. — № 1. — С. 26 – 40.
6. *Демьшев С.Г., Коротаев Г.К.* Численная энергосбалансированная модель бароклинных течений океана с неровным дном на сетке С // *Численные модели и результаты калибровочных расчетов течений в Атлантическом океане.* — М.: ОБМ РАН, 1992. — С. 163 – 231.
7. *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. IV. Черное море. Выпуск 1.* Гидрометеорологические условия. — С.-Пб.: Гидрометеиздат, 1991. — С. 103 – 262.
8. *Кныш В. В., Демьшев С. Г., Коротаев Г. К.* Методика реконструкции климатической сезонной циркуляции Черного моря на основе ассимиляции гидрологических данных в модели // *Морской гидрофизический журнал.* — 2002. — № 2. — С. 36 – 52.
9. *Копылов Ю.П.* Влияние факторов среды на процесс самоочищения морской воды от нефти // *Состояние, перспективы улучшения и использования морской экологической системы прибрежной части Крыма / Тезисы научно-практической конференции, посвященной 200-летию города-героя Севастополя.* — Севастополь: МГИ АН УССР, 1983. — С.3.
10. *Еремеев В.Н., Коновалов С.К., Романов А.С.* Особенности распределения кислорода и сероводорода в водах Черного моря в зимне-весенний период // *Морской гидрофизический журнал.* — 1997. — № 4. — С. 32 – 46.
11. *Miller W.L., Moran M.A.* Interaction of photochemical and microbial processes in the degradation of refractory dissolved organic matter from a coastal marine environment // *Limnol. Oceanog.* — 1997. — 42, № 6. — P. 1317 – 1324.
12. *Еремеев В.Н., Иванов Л.И., Коновалов С.К., Самодуров А.С.* Роль потоков кислорода, сульфидов, нитратов и аммония в формировании гидрохимической структуры основного пикноклина и анаэробной зоны Черного моря // *Морской гидрофизический журнал.* — 2001. — №1. — С. 64 – 82.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь

Материал поступил
в редакцию 30.05.05

ABSTRACT A set of parameterizations of oil assimilation in the oxic, suboxic, and anoxic layers of the Black Sea waters is improved and further developed. Numerical experiments permit to verify and calibrate the model and to simulate the vertical and spatial distribution of oil in oxic and anoxic waters of the Black Sea. The number of oil fractions increases from 3 to 5, the influence of the oxygen concentration and anaerobic and photochemical degradation of oil are parameterized. This permits to quantitatively simulate the observed distribution of oil in the Black Sea waters.