

Параметризация химико-биологических процессов окисления и численное моделирование сезонного хода распределения нефтяных углеводородов в аэробной зоне Черного моря

В работе рассматриваются особенности пространственного распределения, а также предлагаемые в опубликованных работах методы параметризации процессов ассимиляции и окисления растворенной и эмульгированной частей нефтяных углеводородов (НУ) в водах Черного моря. Предложены параметризации процессов деградации НУ, учитывающие их сложный химический состав, протекание химических и микробиологических процессов, а также зависимость этих процессов от температуры. Выполнены численные эксперименты по воспроизведению сезонного хода крупномасштабной пространственной структуры распределения НУ в аэробной зоне Черного моря.

1. Введение

Нефтяные углеводороды (НУ), наряду с различными формами биогенных элементов (нитратным и аммонийным азотом, фосфатным фосфором, а также органическими соединениями этих элементов), являются основными продуктами антропогенного происхождения, поступающими в морскую среду [1]. Общее поступление НУ в морскую среду оценивается величиной в сотни миллионов тонн в год. Годовое поступление НУ в Черное море составляет 110 – 130 тыс. т [2], что близко к ассимиляционной емкости бассейна в отношении этих веществ [3, 4]. Средняя концентрация НУ в открытых водах Черного моря в 80-х годах превышала в 2,5 раза, а максимальные величины превышали в 11–17 раз предельно допустимую концентрацию этих веществ для морской воды [4]. В дополнение к этому предполагается существенное увеличение морских перевозок НУ в Черном море с созданием транспортных коридоров от Кавказского побережья в Украину, Болгарию и через пролив Босфор в Средиземное море. Авария лишь на одном нефтеналивном танкере может привести к единовременному выбросу в морскую среду количества НУ, сравнимого с их годовым поступлением в Черное море. Учитывая, что Черное море расположено в умеренных широтах, последствия изменения в хроническом поступлении НУ или аварийный сброс больших количеств НУ в море будут оказывать влияние на состояние экосистемы в течение нескольких лет.

Исследования поведения НУ в морской среде включали мониторинг их распределения [2, 4], изучение химико-биологических процессов разрушения [5] и численное моделирование физических процессов переноса пленочной фракции НУ в случае их поступления в водную среду в результате, например, аварии на морском транспортном средстве или береговом промышленном комплексе [6, 7].

Методы численного моделирования широко использовались в задачах переноса пленочной фракции НУ [7, 8] с целью прогноза загрязнения акватории и береговой полосы нерастворенными компонентами нефти. Процессы химико-биологического разрушения НУ в таких моделях не рассматривались совсем либо рассматривались в наиболее упрощенной форме.

При хроническом загрязнении НУ поступают в морскую среду преимущественно в растворенной форме или в форме эмульсий. В любом случае именно химические и биохимические процессы определяют окончательную судьбу НУ в море. От интенсивности этих процессов зависит потенциал самоочищения мор-

© С.К. Коновалов, А.И. Кубряков, С.Г. Демьшев, 2004

ской среды в отношении НУ. Для восстановления морской среды после ликвидации источника загрязнения в умеренных широтах требуется от 2 до 10 лет, в арктических морях — до 100 лет, в тропических — 2–3 года.

Химические и микробиологические процессы окисления НУ исследовались достаточно интенсивно [3–5, 9]. Эти исследования распадаются условно на две группы. В первую входят работы, в которых скорость микробного окисления НУ в морской среде определяется как функция от удельной скорости окисления и численности углеводородоокисляющих бактерий. Эти параметры, в свою очередь, являются функциями от состава фракций НУ, температуры, химического состава морской воды, видового состава бактерий и т. д. [5]. В другой группе работ процессы химико-биологического окисления НУ исследуются в рамках формальной кинетики [4].

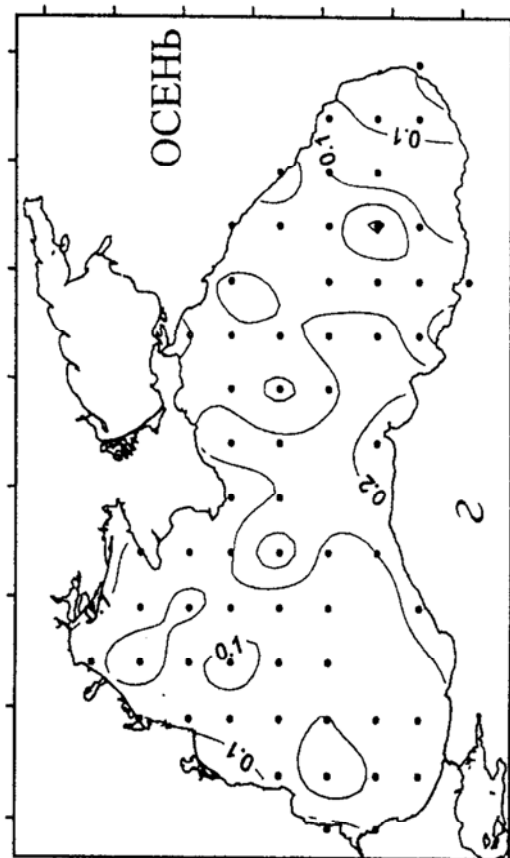
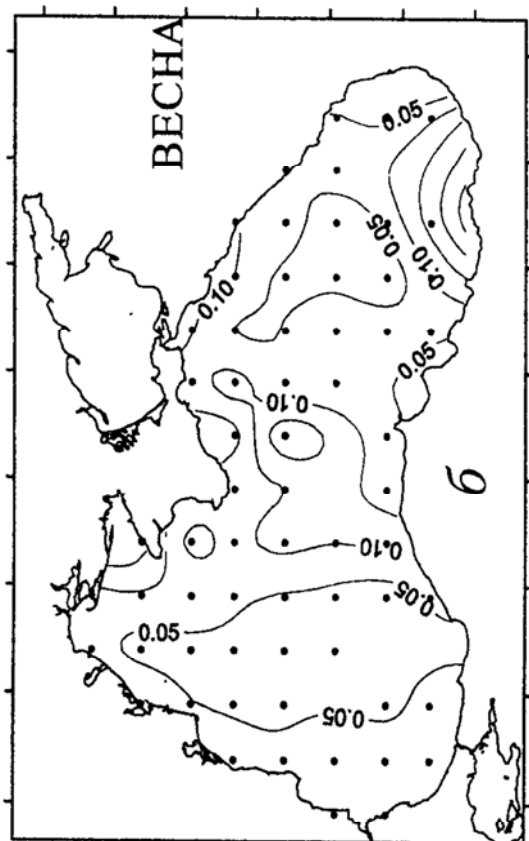
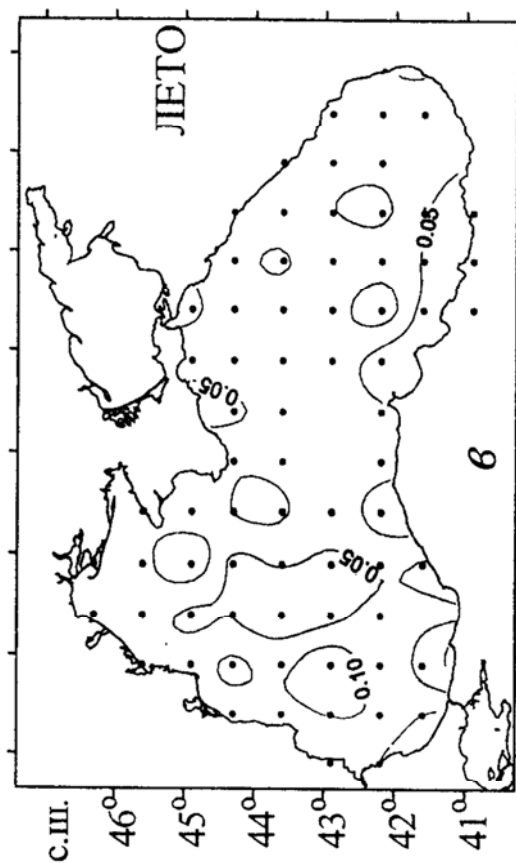
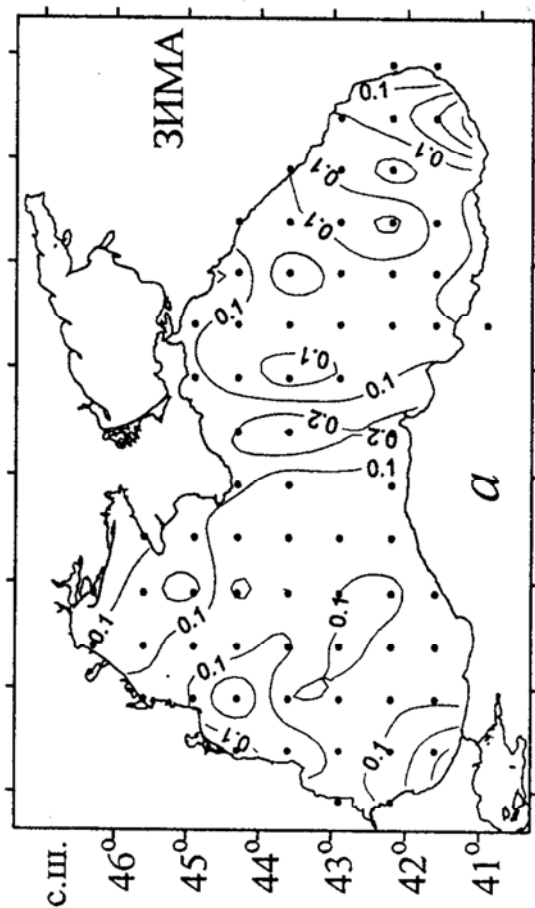
В общем случае скорость химического и биохимического разрушения нефти зависит от таких факторов, как температура, солнечная освещенность, состав и степень дисперсности НУ, концентрация биогенных элементов, численность и адаптированность нефтеокисляющих микроорганизмов, присутствие ядохимикатов и т. д. При всей сложности и многообразии процессов деградации и удаления НУ ситуация облегчается тем, что на относительно коротких промежутках времени основные факторы не столь многочисленны, а скорость трансформации нефти линейно зависит от ее концентрации [4, 9]. Такой подход представляется более приемлемым для решения задач, поставленных в данной работе.

Задача экспериментального и численного исследований поведения НУ в морской среде особенно актуальна для Черного моря как морской системы с резко ограниченным водообменом и чрезвычайно высокой антропогенной нагрузкой [2]. Для Черного моря, как и для других районов Мирового океана, известны численные модели, в которых рассматривается лишь перенос пленочно-взвешенной фракции НУ без учета процессов химического окисления и микробиологической ассимиляции НУ в морской среде [8].

Данная работа посвящена вопросам параметризации химико-биологических процессов окисления НУ в морской воде, а также моделированию сезонного хода пространственного распределения эмульсионно-растворенной фракции НУ в аэробной зоне Черного моря с целью восстановления «фоновых» (в отсутствие аварийных разливов и сбросов НУ) распределения НУ в Черном море.

2. Данные наблюдений, методы и результаты расчета

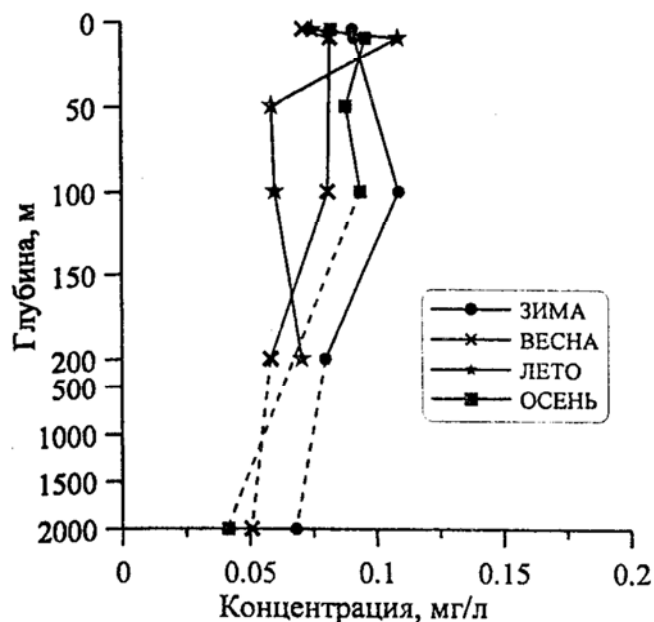
2.1. Основные характерные особенности распределения нефтяных углеводородов в Черном море. Построение крупномасштабной модели сезонного хода пространственного распределения НУ невозможно в отсутствие достаточно полного массива натурных данных. Такой массив данных существует для акватории Черного моря [4]. Это упрощает поставленную задачу, поскольку позволяет представить крупномасштабные характеристики вертикального распределения НУ в различные сезоны. Пространственное распределение НУ на глубине 5 м, построенное по данным работы [4], представлено на рис. 1, а средние профили вертикального распределения НУ представлены на рис. 2.



28° 30° 32° 34° 36° 38° 40° В.Д.

28° 30° 32° 34° 36° 38° 40° В.Д.

Р и с. 1. Пространственное распределение NO_3^- (мг/л) в Черном море на глубине 5 м в различные сезоны года (по осредненным экспедиционным данным за 1978 – 1990 гг. [4])



Р и с. 2. Вертикальное распределение НУ в водах Черного моря в различные сезоны года (по осредненным экспедиционным данным [4])

Количество станций, на которых выполнялся отбор проб для определения содержания НУ, изменялся в различные годы от 13 до 95, количество проб — от 13 до 300 для всей толщи моря [4]. Количество первичных данных, использованных для расчета средних величин и построения сезонных пространственных и вертикальных распределений НУ (рис. 1, 2), изменялось от нескольких десятков до 520.

Несмотря на кажущуюся многочисленность данных, средние величины концентраций статистически слабо обеспечены. Это связано с тем, что концентрации НУ изменяются в широких

пределах при малых средних значениях даже на ограниченной акватории внутри одного сезона. Среднеквадратичное отклонение часто значительно превышает величины средних концентраций [4]. По этим причинам статистический анализ и описание особенностей сезонного хода пространственного распределения НУ в Черном море невозможны. Вместе с тем имеющиеся данные и результаты опубликованных работ [2, 4] позволяют выделить наиболее характерные особенности сезонного хода пространственной изменчивости распределения НУ в водах Черного моря. Основными из этих особенностей являются следующие:

- максимальные концентрации НУ наблюдаются в шельфовых районах и на периферии основных циклонических круговоротов, в том числе в глубоководной части, разделяющей районы влияния западного и восточного циклонических образований;

- наибольшие значения концентраций в поверхностных водах наблюдаются в прибрежных районах северо-западного шельфа моря, вблизи крупных городов-портов и устьев рек, а также в районе, примыкающем к проливу Босфор;

- в зимний период года часто наблюдаются максимальные средние концентрации НУ в поверхностных водах;

- в летний период года наблюдаются минимальные средние концентрации НУ в поверхностных водах (0,05 мг/л);

- в среднем концентрации НУ в поверхностном слое вод снижаются от зимы к лету и увеличиваются от лета к осени;

- вертикальное распределение НУ в верхнем 200-метровом слое характеризуется максимальными концентрациями не на поверхности моря, а на глубинах сезонного термоклина и холодного промежуточного слоя, и слабым уменьшением средних концентраций НУ от ~ 0,1 мг/л на глубине 10 – 50 м до ~ 0,07 мг/л на глубине 200 м;

— вертикальное распределение НУ в более глубоких водах характеризуется уменьшением средних концентраций до $\sim 0,05$ мг/л в придонных водах моря.

2.2. Модель циркуляции моря. Для расчета сезонной эволюции циркуляции и термохалинной структуры вод моря использовалась трехмерная нелинейная модель [10, 11], основанная на полных уравнениях гидротермодинамики. Численная схема, уравнения модели и ее свойства подробно описаны в упомянутой работе.

Численная модель адаптирована к физико-географическим условиям Черного моря с шагами по горизонтали, равными 11 и 8' в меридиональном и зональном направлениях соответственно. По вертикали выбрано 20 горизонтов (5, 10, 20, 30, 50, 75, 100, 125, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600, 800, 1000, 1200, 1500, 2000 м), для которых вычислялись температура и соленость морской воды, а также горизонтальные составляющие скорости. Для глубин посередине между указанными горизонтами рассчитывалась вертикальная скорость.

Коэффициенты турбулентной вязкости по вертикали и горизонтали, в соответствии с [11], принимались равными 5 и 10^7 см²/с соответственно; коэффициент горизонтальной турбулентной диффузии

$$A_H = 5 \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{с},$$

коэффициент вертикальной турбулентной диффузии

$$K_H = \begin{cases} 2,5 \text{ см}^2/\text{с}, & z \leq 10 \text{ м}, \\ 0,1 \text{ см}^2/\text{с}, & 10 \text{ м} < z < 20 \text{ м}, \\ 0,03 \text{ см}^2/\text{с}, & z \geq 20 \text{ м}, \end{cases}$$

где z — глубина моря.

На поверхности моря задавались тангенциальное напряжение трения ветра и потоки тепла и соли, причем диффузионный поток соли был пропорционален разности между осадками и испарением. Данные о ветре, осадках и испарении взяты из [12], а о потоках тепла — из [13].

На твердых боковых границах ставились условия непротекания и отсутствия потоков тепла и соли. На жидких участках границы, где втекают реки и нижнебосфорское течение, принимались следующие условия для составляющих скорости, температуры и солености воды: $u = \partial v / \partial x = 0$, $T = T_g$, $S = S_g$ — на меридиональных и $v = \partial u / \partial y = 0$, $T = T_g$, $S = S_g$ — на зональных участках, причем воды, вносимые реками, имели соленость, равную нулю, и зависящую от времени температуру, равную своему среднеклиматическому значению [14].

Воды, вносимые нижнебосфорским течением, имели соленость, равную 35 ‰, и температуру, равную 16°C, что соответствует характеристикам вод Мраморного моря. Для верхнебосфорского течения для составляющих скорости ставились такие же условия, как и для нижнебосфорского, а для температуры и солености воды $\partial T / \partial x = \partial S / \partial x = 0$ — на меридиональных и $\partial T / \partial y = \partial S / \partial y = 0$ — на зональных участках. На дне принимались условия прилипания и отсутствия потоков тепла и соли. Задача решалась в приближении «твердой крышки». Шаг по времени равнялся 20 мин.

Предварительно проводился гидродинамический расчет на десятилетний период от состояния покоя с заданным начальным распределением температуры и солености, при этом среднемесячные климатические поля для задания граничных условий линейно интерполировались на каждый шаг по времени. Полученные поля скорости течений, температуры и солености принимались за начальные, и в дальнейшем расчеты проводились совместно с моделью трансформации НУ.

2.3. Модель трансформации нефтяных углеводородов в морской среде и параметризация химико-биологических процессов их окисления. Решение задачи построения модели сезонного цикла распределения НУ в морской экосистеме и прогноза долгосрочных (до 10 лет) последствий аварийных сбросов значительных количеств НУ в море предполагает включение в численную схему параметризаций химико-биологических процессов окисления НУ в морской среде. Эти параметризации должны эффективно описывать химические и микробиологические процессы окисления многокомпонентной по своему химическому составу смеси углеводородов [4, 5]. Кроме того, такие параметризации должны отражать зависимость кинетики этих процессов от ряда внешних факторов, основными из которых являются температура, концентрация кислорода, состояние и численность сообщества нефтеокисляющих бактерий, соленость, освещенность, присутствие ядохимикатов.

Первые два фактора (температура и содержание кислорода) в условиях, характерных для большей части Черного моря, оказывают наибольшее влияние на скорость окисления НУ в морской воде. Это справедливо как для химических, так и для микробиологических процессов окисления НУ. Наиболее типичной параметризацией химико-биологических процессов окисления НУ является такая, в которой используются принципы формальной кинетики химических процессов [3]. Количество НУ, остающееся в водной среде по истечении некоторого промежутка времени t , описывается следующим образом:

$$C = \sum_{k=1}^m C_k = \sum_{k=1}^m C_k^0 \exp(-(\tilde{t}_k - a_k n_k)^{-1} t \ln 2), \quad (1)$$

где C — концентрация смеси m фракций НУ; C_k^0 — начальная концентрация k -й фракции смеси; C_k — концентрация k -й фракции НУ в момент времени t ; $\tilde{t}_k$ — характерное время разрушения k -й фракции НУ на 50 % в результате химических процессов; a_k — удельная константа, характеризующая уменьшение времени разрушения k -й фракции НУ на 50 % с учетом микробиологических процессов в расчете на одну клетку; n_k — количество клеток микроорганизмов, перерабатывающих k -ю фракцию; t — время, прошедшее с момента сброса НУ.

В настоящей работе при построении модели трансформации НУ полагалось, что процесс трансформации НУ описывается следующими уравнениями, выражающими изменение во времени и пространстве концентрации C_k каждой фракции:

$$\frac{\partial C_k}{\partial t} + \frac{\partial C_k u}{\partial x} + \frac{\partial C_k v}{\partial y} + \frac{\partial C_k w}{\partial z} = F_k + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_H \frac{\partial C_k}{\partial z} \right) + \mu_k C_k. \quad (2)$$

Здесь t — время; u, v, w — компоненты скорости в прямоугольной системе координат x, y, z , оси которой направлены соответственно на восток, север и вертикально вниз; $F_k \equiv \frac{\partial}{\partial x}(A_H \frac{\partial C_k}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(A_H \frac{\partial C_k}{\partial y})$ — член, описывающий горизонтальную турбулентную диффузию; A_H, K_H — коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентной диффузии, описанные выше; μ_k — коэффициенты неконсервативности, учитывающие изменение концентрации примеси вследствие химических и биологических превращений (в общем случае являющиеся функциями координат и времени) и имеющие в соответствии с (1) следующий вид:

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

Для Черного моря характерные величины $\tilde{t}_k$ для дизельного топлива изменяются от 70 до 100 дней⁻¹, $a_k = 0,08$, при условии, что n_k определяет количество клеток нефтеокисляющей микрофлоры в 1 мл воды [4], которое в данной работе принималось постоянным и равным 1000.

Необходимо отметить, что такое уравнение не отражает зависимости скорости процессов от внешних факторов, в первую очередь температуры, что не позволяет корректно моделировать сезонный ход распределения НУ. Температурная зависимость скорости окисления НУ описывается уравнениями Аррениуса. Уменьшение скорости окисления НУ в 1,5 – 2 раза при снижении температуры на каждые 10°C является классическим примером влияния температуры на кинетику химических процессов. В работе [15] приводятся данные о том, что скорость микробиологического окисления НУ также снижается в 1,4 – 1,5 раза при уменьшении температуры на каждые 10°C. С учетом этого влияния температуры на скорость окисления НУ зависимость величины $\tilde{t}_k$ от температуры воды может быть представлена в виде уравнения

$$t_k^T = t_k^{T_0} (A)^{\frac{T-T_0}{10}}, \quad (4)$$

где T — температура воды; T_0 — температура воды, для которой известна величина $t_k^{T_0}$; A — коэффициент температурной зависимости, изменяющийся от 1,1 до 1,5 (таблица).

Параметры уравнений (2) – (5), описывающие характеристики химико-биологического окисления НУ в водах Черного моря в зависимости от температуры и с учетом присутствия легкой, средней и тяжелой фракций углеводородов

Фракция	t_k при 20°C (сутки)	a_k при 20°C	A	B
Легкая	55	0,05	1,5	1,45
Средняя	100	0,03	1,5	2,0
Тяжелая	600	0,005	1,1	2,0

Аналогично величина a_k зависит от температуры следующим образом:

$$a_k^T = a_k^{T_0} (B)^{\frac{T-T_0}{10}}, \quad (5)$$

где B — коэффициент температурной зависимости, изменяющийся от 1,5 до 2,0 (таблица).

Понятно, что кинетика окисления и ассимиляции различных компонент смеси НУ должна быть существенно различной. Так, алкены и легкие фракции гомологического ряда алканов окисляются во много раз быстрее тяжелых фракций алканов и аренов [3]. Другими словами, скорость окисления НУ многократно увеличивается в ряду бензин — керосин — дизельное топливо — мазут — смолы. Это проявляется в том, что при попытке параметризации окисления НУ одним уравнением типа (1) или (2) константы, описывающие удельную скорость окисления НУ становятся функциями от времени [9].

С учетом имеющихся в литературе данных о скорости окисления НУ, скорости изменений средних концентраций и пространственном распределении НУ в водах моря [4] были выбраны параметры уравнений (2) — (5), представленные в таблице. Выбранные параметризации позволяют моделировать особенности изменений пространственного распределения НУ на синоптическом, сезонном и межгодовом масштабах.

2.4. Начальные условия. Рассчитанные на десятилетний срок поля скорости течений, температуры и солености по чисто гидродинамической модели принимались за начальные.

Пространственное распределение НУ в водах Черного моря в начальный момент времени задавалось однородным по акватории моря для каждого из рассматриваемых в модели горизонтов. Вертикальное распределение НУ соответствовало профилям среднего сезонного распределения НУ (рис. 2), рассчитанным по осредненным данным, представленным в работе [4].

Соотношение легкой, средней и тяжелой фракций НУ в начальный момент времени численных экспериментов задавалось для различных горизонтов следующим образом: 6:3:1 — для поверхности моря, 3:5:2 — на глубине 10 м, 1:7:2 — на глубине 50 м, 0:4:6 — на глубине 100 м, 0:1:9 — на глубине 200 м и 0:0:10 — на глубине 2000 м. Такой характер изменения соотношения различных фракций НУ соответствует общим представлениям о соотношении скорости обновления вод соответствующих глубин моря и скорости окисления соответствующих фракций НУ.

2.5. Поступление нефтяных углеводородов в Черное море. Задание граничных условий. В настоящей работе на твердой боковой границе задавался нулевой нормальный поток НУ, так же как и в проливе Босфор в верхних слоях, где вода вытекает из моря. В точках, где вода втекает в море, т. е. в устьях рек и в нижних слоях пролива Босфор, задавалось значение концентрации нефтяных углеводородов C_{kN} , которые вносятся вместе с поступающей (со скоростью u_n) водой. Поступление НУ в Черное море с речными водами и водами нижнего босфорского течения определялось пропорционально объему среднемесячного стока:

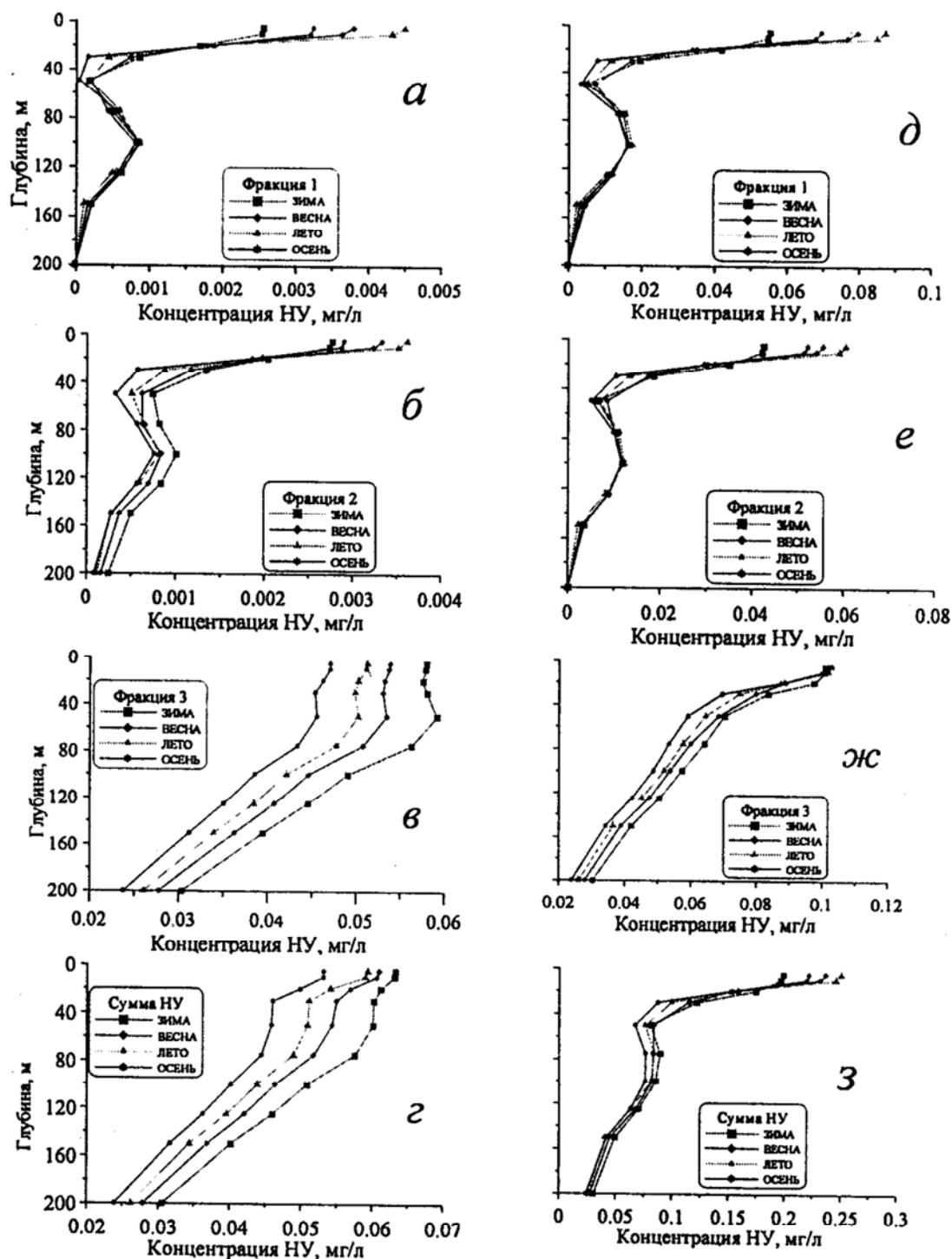
$$Q_{kn} = C_{kN} u_n.$$

Концентрация НУ в речных водах считалась постоянной $C_{kN} = 0,39$ мг/л, что для всего моря составляло $131 \cdot 10^3$ т/год [4], а концентрация НУ в водах нижнего босфорского течения $C_{kN} = 0,12$ мг/л. Соотношение легкой, средней и тяжелой фракций НУ в речных водах и в водах, поступающих в Черное море через про-

лив Босфор, принималось равным 6:3:1. Береговой сток, а также технологическое загрязнение в портовых акваториях и в результате эксплуатации флота не учитывались.

На дне моря задавалось отсутствие потоков НУ:

$$\frac{\partial C_k}{\partial z} = 0.$$



Р и с. 3. Среднее вертикальное распределение легкой (фракция 1), средней (фракция 2), тяжелой (фракция 3) фракций и суммарного содержания НУ в водах Черного моря в различные «сезоны» численного эксперимента при суммарном поступлении НУ в море, равном опубликованным оценкам (а — г) и превышающем опубликованные величины в 10 раз (д — з)

На поверхности моря задавался поток НУ, попадающих в море с осадками:

$$Q_{ok} = C_{ok}PREC,$$

где $PREC(x, y, t)$ — количество осадков в единицу времени. Концентрация НУ в атмосферных выпадениях принималась равной $C_{ok} = 0,14$ мг/л, что для всей акватории Черного моря составляло $29,61 \cdot 10^3$ т/год [16]. Соотношение легкой, средней и тяжелой фракций НУ в атмосферных выпадениях принималось равным 1:1:1. Поступление НУ через Керченский пролив не рассматривалось.

Испарение НУ с поверхности моря не учитывалось, поскольку рассматривалась эмульсионно-растворенная фракция НУ в отсутствие пленки НУ на поверхности моря, подверженной интенсивному ветровому воздействию. Переход эмульсионно-растворенной фракции во взвешенную, так же как и соосаждение НУ со взвесью не рассматривались.

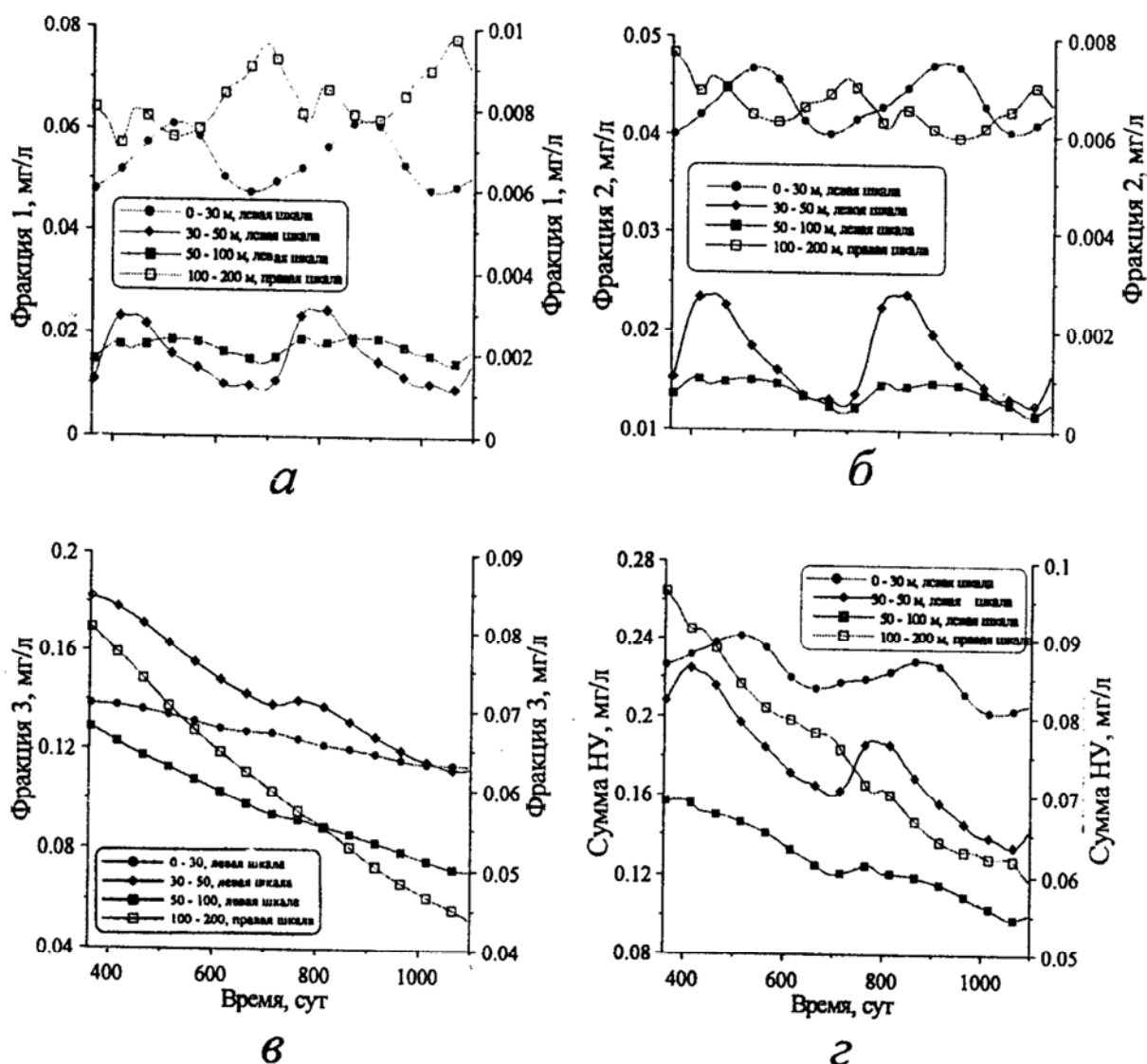
3. Обсуждение результатов численных экспериментов

3.1. Среднее вертикальное распределение: сезонный и многолетний ход. На рис. 3 представлены средние по акватории моря вертикальные распределения НУ, полученные в результате численных экспериментов при различном суммарном поступлении НУ. Величины концентраций слабо менялись в верхнем 100-метровом слое вод и плавно уменьшались в более глубоких слоях при суммарном поступлении НУ, соответствующем опубликованным данным [2, 4]. В целом результаты численных экспериментов показывают, что среднее вертикальное распределение НУ при их суммарном поступлении, соответствующем опубликованным данным, качественно совпадает с результатами натурных наблюдений. Абсолютные величины концентраций, как отмечалось выше, были в 1,5 – 2 раза меньше наблюдаемых в море. Кроме того, величины концентраций в период времени счета, соответствующий 3 – 4-му годам эволюции экосистемы Черного моря, продолжали уменьшаться. Результаты численных экспериментов указывают на одну из следующих или одновременно на несколько возможных причин полученного количественного несоответствия рассчитываемых и наблюдаемых средних концентраций НУ в водах моря:

— опубликованные оценки поступления НУ в Черное море могут быть существенно занижены;

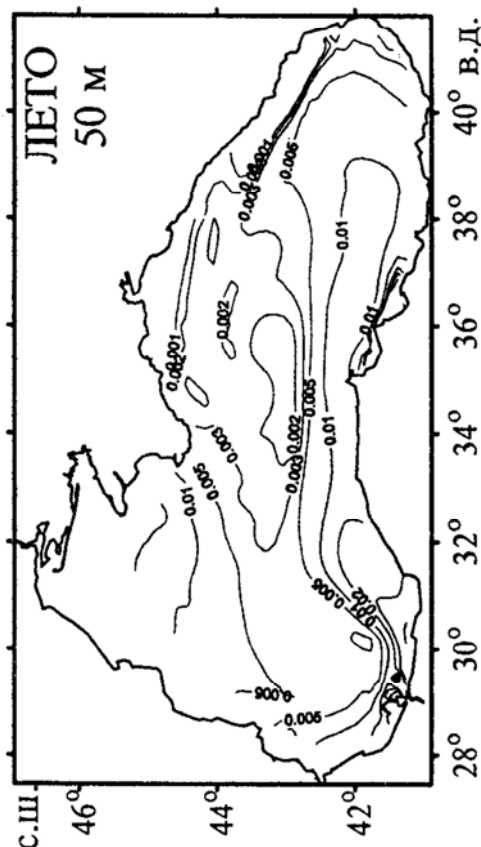
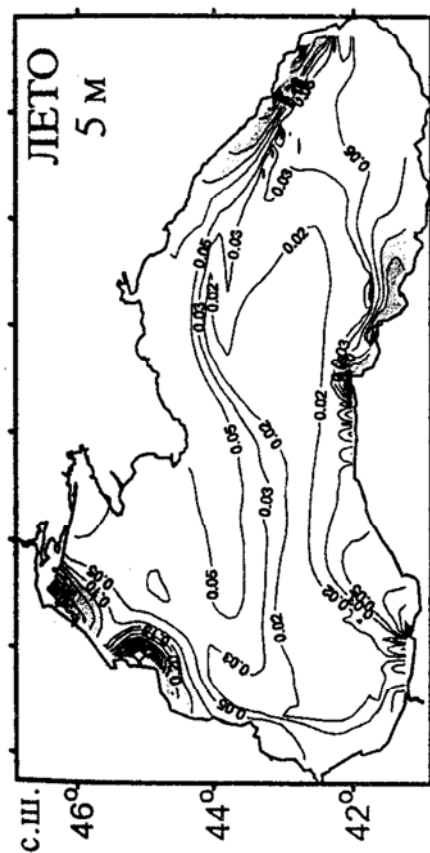
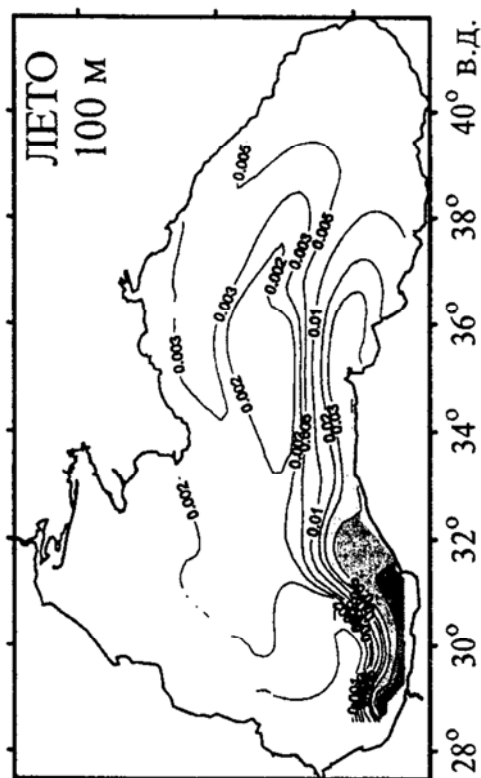
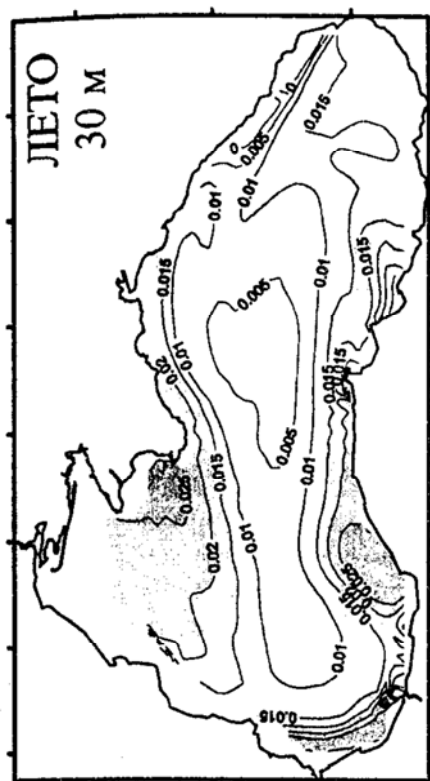
— влияние резкого уменьшения концентрации кислорода и вероятного уменьшения активности сообщества нефтеокисляющих бактерий с глубиной должно быть включено в численную схему модели.

В случае 10-кратного увеличения поступления НУ в море распределение легкой и средней фракций этих веществ отражает состояние экосистемы, соответствующее или близкое к равновесному, при котором средняя годовая концентрация НУ не изменяется, а ход текущих концентраций отражает сезонные изменения в распределении НУ. Это относится в первую очередь к распределению легкой и средней фракций во всех рассматриваемых слоях вод (рис. 4). В случае тяжелой фракции НУ распределение по-прежнему остается нестационарным, что подтверждает необходимость изменения соотношения фракций НУ, поступающих в море с береговым стоком и атмосферными выпадениями, в сторону увеличения доли тяжелой фракции. Более существенным результатом являются качественные изменения в вертикальном распределении суммарной концентрации НУ (рис. 3), указывающие на возможные последствия увеличения поступления НУ в Черное море.



Р и с.4. Внутригодовые изменения величины средней концентрации легкой (фракция 1), средней (фракция 2), тяжелой (фракция 3) фракций и суммарного содержания НУ в различных слоях вод Черного моря

Результаты выполненных численных экспериментов позволяют исследовать роль отдельных фракций НУ в сезонном ходе среднего суммарного вертикального распределения НУ. Из данных, представленных на рис. 3 и 4, следует, что при поступлении НУ, соответствующем опубликованным оценкам [2, 4], от 90 до 100 % средней концентрации обеспечивается присутствием тяжелой фракции НУ. Эта величина закономерно растет от поверхностных к глубинным водам. Легкая и средняя фракции НУ определяют особенности сезонного хода среднего вертикального распределения НУ в Черном море, для которого характерны максимальные величины концентраций в весенне-летний период и минимальные — в зимний. Последнее в значительной степени является результатом сезонных изменений в объеме речного стока, обеспечивающего наибольшее поступление НУ в море.



Р и с. 5. Пространственное распределение (мг/л) средней фракции НУ на различных горизонтах аэробной зоны Черного моря в «летний» период численного эксперимента

Полученные результаты численных экспериментов совпадают с опубликованными данными и общими представлениями о сезонных изменениях среднего вертикального распределения НУ:

- сезонные изменения проявляются в виде годовых гармонических колебаний с максимальной амплитудой в верхнем 30 – 50-метровом слое;

- в более глубоких слоях вод амплитуда сезонных колебаний величины средней концентрации НУ значительно убывает, а сами колебания становятся более сложными, отражая влияние различных действующих факторов (сезонные изменения поступления НУ с береговым стоком и атмосферными выпадениями, интенсивности вертикального перемешивания, потока тепла и температуры, изменения поступления НУ с водами нижнего босфорского течения и т.д.);

- экстремальные величины концентрации НУ наблюдаются в различные сезоны на разных глубинах моря, что является дополнительным отражением многообразия факторов, определяющих сезонные изменения величины средней концентрации НУ в различных слоях вод Черного моря.

В целом полученные данные позволяют говорить о том, что используемая в данной работе модель качественно правильно воспроизводит вертикальное распределение НУ в водах Черного моря и сезонные изменения этого распределения.

3.2. Пространственное распределение нефтяных углеводородов. На рис. 5 представлено распределение средней фракции НУ в «летний» период численного эксперимента. Выбор этой фракции для анализа пространственных особенностей распределения НУ обусловлен тем, что именно она определяет в значительной степени особенности сезонного хода пространственного распределения НУ. Полученные данные (рис. 5) отражают основные особенности пространственного распределения НУ в различные сезоны года:

- максимальные концентрации НУ наблюдаются в шельфовых районах и на периферии основных циклонических круговоротов, в том числе в глубоководной части, разделяющей районы влияния западного и восточного циклонических образований;

- наибольшие значения концентраций в поверхностных водах наблюдаются в прибрежных районах северо-западного шельфа моря, вблизи крупных городов-портов и устьев рек, а также в районе, примыкающем к проливу Босфор;

- площадь акваторий, для которых характерно минимальное содержание НУ, в восточной части моря часто больше аналогичных районов в западной части;

- районы, примыкающие к устьям рек (в первую очередь это относится к приустьевым акваториям Дуная и Днестра), характеризуются одновременно максимальными величинами средних концентраций и максимальным диапазоном изменений концентрации НУ в этих районах при переходе от «зимнего» к «летнему» сезону;

- при переходе от «зимнего» к «летнему» сезону наблюдается повышение концентраций НУ в приустьевых районах моря и снижение средних концентраций в поверхностном слое вод глубоководной части.

Кроме того, было показано, что в более глубоких слоях вод, в первую очередь на глубинах 100 – 150 м (рис. 5), особенности пространственного распределения НУ зависят от их поступления с водами нижнего босфорского течения. Это одно из существенных проявлений влияния водообмена через Босфор на состояние экосистемы всего моря, которое в опубликованных работах не обсуждалось.

Таким образом, предложенные параметризации химико-биологических процессов и источников поступления НУ в Черное море в рамках используемой модели Коротаева–Демьшева позволяют качественно правильно описать известные особенности крупномасштабной изменчивости распределения НУ в аэробной зоне моря. Дальнейшие работы должны быть направлены на уточнение соотношения фракций НУ, поступающих в Черное море, а также включение в схемы расчета параметризаций, учитывающих существенную вертикальную неравномерность распределения кислорода, и удельной и общей активности сообщества нефтеокисляющих микроорганизмов.

Работа выполнена в рамках международного проекта № 1547 «Диагноз переноса загрязняющих веществ во внутренних морях с использованием спутниковых данных» Украинского научно-технического центра. Авторы признательны участникам этого проекта, а также другим сотрудникам МГИ НАН Украины, замечания и предложения которых способствовали улучшению данной работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Проблемы химического загрязнения Мирового океана*. Т. 1. Динамика и прогноз загрязнения океанических вод / Под. ред. А.И. Симонова. — Л.: Гидрометеиздат, 1985. — 144 с.
2. *Black Sea Transboundary Diagnostic Analysis*. — Istanbul: The Global Environmental Facility. Black Sea Environmental Programme. Programme Coordination Unit, 1996. — p. 33.
3. *Процессы самоочищения морских вод от химических загрязнений*. — М.: Гидрометеиздат, 1978. — 152 с.
4. *Гидрометеорология и гидрохимия морей*. Т. IV. Черное море. Вып. 3. Современное состояние загрязнения вод Черного моря / Под ред. А.И. Симонова, А.И. Рябикина. — Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 1996. — 230 с.
5. *Цыбань А.В., Симонов А.И.* Процессы микробного окисления нефти в море (обзор) // *Океанология*. — 1978. — 18. — С. 695 – 708.
6. *Yapa P.D., Shen H.T., Angammana K.S.* Modeling oil spills in a river-lake system // *J. Mar. Syst.* — 1994. — 4. — P. 453 – 471.
7. *Proctor R., Flather R.A., Elliot A.J.* Modelling tides and surface drift in the Arabian Gulf – application to the Gulf oil spill // *Cont. Shelf Res.* — 1994. — 14. — P. 531 – 545.
8. *Козий Л.И., Мадерич В.С.* Численное моделирование распространения нефтяных пятен в Одесском заливе // *Наук. праці УкрНДГМІ*. — 2000. — Вип. 248. — С. 242 – 247.
9. *Миронов О.Г.* Нефтеокисляющие бактерии севастопольских бухт (итоги 30-летних наблюдений) // *Экология моря*. — 1999. — Вып. 48. — С. 87 – 91.
10. *Демьшев С.Г., Коротаев Г.К.* Численная энергосбалансированная модель бароклинных течений океана с неровным дном на сетке *C* // *Численные модели и результаты калибровочных расчетов течений в Атлантическом океане*. — М.: Ин-т вычислительной математики РАН, 1992. — С. 163 – 231.
11. *Демьшев С.Г., Коротаев Г.К., Кныш В.В.* Численное моделирование сезонной изменчивости гидрофизических полей Черного моря // *Морской гидрофизический журнал*. — 2002. — № 3. — С. 12 – 27.

12. *Staneva J.V., Stanev E.V.* Oceanic response to atmospheric forcing derived from different climatic data sets. Intercomparison study for the Black Sea // *Oceanologia Acta*. — 1998. — 21(3). — P. 383 – 417.
13. *Ефимов В.В., Тимофеев Н.А.* Теплобалансовые исследования Черного и Азовского морей. — Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 1990. — 237 с.
14. *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. IV. Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия.* — С.-П.: Гидрометеоиздат, 1991. — С. 103 – 262.
15. *Копылов Ю.П.* Влияние факторов среды на процесс самоочищения морской воды от нефти // Состояние, перспективы улучшения и использования морской экологической системы прибрежной части Крыма / Тез. докл. научно-практической конференции, посвященной 200-летию города-героя Севастополя. — Севастополь, 1983. — С. 3.
16. *Губанов В.И., Назаренко С.А., Рябинин А.И.* Современное состояние полей нефтяных углеводородов в Черном море // *Океанографические аспекты охраны морей и океанов от химических загрязнений.* — М.: Гидрометеоиздат, 1990. — С. 95 – 98.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь

Материал поступил
в редакцию 10.09.02
После доработки 17.09.02

ABSTRACT Peculiarities of spatial distribution and already proposed methods of parameterization of the processes of assimilation and oxidation of the dissolved and the emulsified fractions of oil hydrocarbon (OH) in the Black Sea waters are considered. Proposed is a set of parameterizations of OH biochemical degradation taking into account their complex chemical composition, and chemical and microbiological processes depending on temperature. Seasonal variations of a large-scale spatial structure of OH distribution in the aerobic zone of the Black Sea are simulated in the numerical experiments.