

УДК 551.46:539.219.1:621.375.826

В. Г. Мерзликін

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ  
НА ВОДНО-ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ  
АТЛАНТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ ГОЛЬФСТРИМ**

*На основе концепции лучистого теплопереноса для деятельного 50-метрового слоя океана, верхний подповерхностный слой которого представляет собой водно-нефтяную эмульсию, рассматриваемую как светорассеивающую и поглощающую среду, исследован водно-тепловой режим поверхностного слоя, загрязненного нефтью. Установлено влияние увеличения потоков солнечного излучения отраженного и поглощенного слоев водно-нефтяной эмульсии, на максимальное значение температуры в приповерхностном слое и снижение прогрева глубинных слоев. Результаты проведенного анализа показывают, что нефтяное загрязнение, играющее роль теплоизоляции, ограничивает поверхностное испарение при штиле, но в штормовую погоду способствует зарождению и усилению ураганов, а процесс диссипации тепловой энергии перегретого поверхностного слоя океана влияет на формирование обезвоженных воздушных потоков, обуславливает дефицит осадков на европейском континенте и возможное похолодание, связанное с понижением средней температуры атлантического течения Гольфстрим.*

**E-mail: MerzlikinV@mail.ru**

**Ключевые слова:** нефтяные загрязнения, водно-нефтяная эмульсия, океан, климатические аномалии, излучение, отражение, рассеяние, поглощение, теплообмен, температурный максимум, скин-слой, испарение.

**Анализ проблемы и постановка задачи.** Климат европейского континента в большой степени характеризуется воздействием теплого течения Гольфстрим, определяющим мягкий климат Западной и Центральной Европы в сравнении с восточными регионами. Но проявившиеся с июля 2010 г. аномальные климатические изменения, никогда ранее не регистрировавшиеся за все время инструментальных наблюдений, вынуждают обратить особое внимание на возможные изменения водно-теплового режима знаменитого течения. К погодным катаклизмам можно отнести удивительно жаркое лето на Русской равнине (на фоне необычно холодного в Западной Сибири), рекордно высокие температуры поверхности океана (ТПО или SST по европейской терминологии) в северной Атлантике и последующую необычайно суровую и снежную зиму в Западной Европе 2010/11 г. Такие резкие температурные изменения за короткий период естественными климатическими колебаниями объяснить невозможно, и актуальным становится поиск причин антропогенного воздействия на природу. Так как

районом зарождения Гольфстрима, точнее усиления его энергии после прихода из Африки, является Мексиканский залив, то для многих наблюдателей стало логичным связать погодные аномалии с техногенной катастрофой в Мексиканском заливе — разливом нефти, несмотря на его относительно малую площадь. Во многих случаях антропогенный фактор играет роль малого параметра в неустойчивых термодинамических системах, в частности, природных катаклизмов [1–2]. Наблюдаемое увеличение техногенных катастроф, как правило, связано с интенсивным загрязнением окружающей среды, прежде всего с добычей и транспортом больших объемов углеводородного сырья. Это актуально для России с развитым нефтегазовым промышленным комплексом, нуждающимся в срочной модернизации и обновлении [3], особенно учитывая последствия катастрофической аварии в Мексиканском заливе [4–6]. Отдельные публикации указывают на то, что в настоящий момент до 20 % Мирового океана уже было подвержено воздействию разливов нефти и нефтепродуктов. Суммарный выброс за год достигает по разным оценкам не менее 5 млн. тонн. Разлив нефти в Мексиканском заливе уже в августе 2010 г. способствовал появлению масштабных нефтяных загрязнений у восточного побережья США. При ширине Гольфстрима порядка 100–150 км и общей протяженности его маршрута до 5000 км перенос водных масс обусловил площадь загрязнения не менее миллиона квадратных километров, что проиллюстрировано на карте загрязнения поверхности Атлантического океана, полученной NASA (рис. 1, 4-я полоса обложки). Видно, что в центре Северной Атлантики образовалось громадное размываемое нефтяное пятно уже далеко вышедшее за пределы залива [5, 6].

Настоящая работа посвящена анализу крупномасштабных нефтяных загрязнений, их влияния на водно-тепловой режим системы нефтяное загрязнение – вода океана – атмосфера, представляемой многослойной полупрозрачной рассеивающей средой, и связанных с этим возможных климатических изменений.

**Физическая модель и принятые допущения.** Начиная с 70-х годов прошлого столетия был разработаны ряд комплексных физических моделей светорассеивающих и поглощающих сред, позволивших сформулировать новые математические модели природных процессов [7–9] и объяснить ряд наблюдаемых явлений для полярных и высокогорных ледников, а также решить некоторые прикладные задачи, связанные с созданием огнезащитных и теплоизолирующих материалов и покрытий различного назначения [10–17]. Отличительная особенность отмеченных исследований — изучение сложного теплообмена для оптических неоднородных сред путем совместного решения уравнений теплопроводности и переноса излучения на основе разработан-

ных и апробированных оптических моделей материалов в условиях интенсивного конвективно-радиационного воздействия.

Однако в области океанологии и в России, и за рубежом десятилетиями не менялась методология оценки и анализа водно-теплового баланса, температуры поверхности океана и, в частности, интерпретации так называемого холодного скин-слоя [4, 18–23]. Несмотря на прецизионные измерения распределения температуры воды в океане по глубине с точностью до миллиметра, оценка тепловых режимов водных акваторий ограничивалась применением закона сохранения энергии, неполной краевой задачей лучистого теплообмена без детального анализа распространения проникающего солнечного излучения в толще воды. Нередко воздействующий на поверхность океана лучистый поток представлялся только аддитивной величиной потоков проникающего солнечного излучения и поглощаемого поверхностью океана излучения атмосферы. Исследование морской воды как среды, обладающей не только поглощением, но и рассеянием, ограничивалось так называемым параметрическим описанием формирующего теплового баланса [18, 19, 21, 22], что обусловило некорректную трактовку наблюдаемого подповерхностного максимума температуры. В качестве возможных причин называлось влияние конвективного и терморрадиационного выхолаживания, турбулентных возмущений, но фактор лучистого объемного нагрева во всей подповерхностной области (включая скин-слой) не стал предметом исследования с позиций оптики рассеивающих сред [4, 18–23]. Здесь сказалась неосведомленность океанологов о подобных исследованиях в других областях науки и техники, в которых были достигнуты значительные результаты. Например, уже сейчас необходимо учитывать эффект формирования подповерхностного температурного максимума в океане при воздействии коллимированных потоков проникающего солнечного излучения в оптически неоднородной среде [12, 13].

Хотя оптика океана была предметом многолетних исследований в Институте океанологии им. П.П. Ширшова, в частности, известного советского ученого К.С. Шифрина, тем не менее задача сложного теплообмена на современном уровне в океанологии еще не решена. Это связано с различными причинами, одна из которых — необходимость дифференциации эффектов отражения и переизлучения водной средой — весьма существенна, на что, впрочем, указывал в своих работах сам К.С. Шифрин [24]. Но указанные разработки в России фактически завершились в 90-х гг. прошлого века [1, 23]. За рубежом проблема сложного теплообмена для океана также полностью не решена и не получила должного развития [4, 21, 22] из-за свойственных Западу, несмотря на тщательные инструментальные исследования, нередкого

застоя в теории и недостаточных междисциплинарных связей в науке. На это указывает, например, анализ работ немецких специалистов [4, 15], опубликованных без единой ссылки на работы российских исследователей, опубликованные как в российских, так и зарубежных изданиях.

Подобная ситуация складывалась и при изучении другой природной среды — ледников, в толще которых уже в 60–70-х гг. тоже регистрировался подповерхностный перегрев при сложном теплообмене для снежного слоя [25]. Теоретическое обоснование этого эффекта было получено автором совместно с М.С. Крассом в 1985 г. [8, 9], что было экспериментально подтверждено радиозондированием американскими учеными Ж. Кохом и Р. Йорданом в 1995 г. [26] (опять-таки без ссылок, например, на монографию [8]), а с позиций теории радиационно-кондуктивного теплообмена в многослойной рассеивающей среде проанализировано в работе [27].

Конечно, океан является более сложной средой, в которой необходимо учитывать дополнительно диффузию солей и турбулентное перемешивание, что существенно усложняет анализ процесс нагрева и его моделирование. Но в первом приближении этими явлениями можно пренебречь, чтобы выявить влияние основных процессов лучисто-кондуктивного теплообмена в рассеивающей и поглощающей морской среде. Присутствие какого-либо загрязнения только усиливает ослабление излучения, влияет на отражательную способность (альбедо) и снижает нагрев глубинных горизонтов океана.

В данной работе предлагаются новые физические модели водно-теплового баланса акваторий океана и атмосферных потоков, образующихся над водной поверхностью, загрязненной разливом нефтепродуктов. Загрязнения на поверхности воды рассматриваются как полупрозрачные водно-нефтяные эмульсии (ВНЭ), взвеси (пленки) инородных частиц с различными физическими и геометрическими параметрами, определяющие селективные свойства ослабления водной средой потоков излучения в видимом, ближнем и среднем ИК-диапазонах спектра солнечного излучения и атмосферы в условиях естественной конвекции. В проводимом анализе использованы данные об оптических свойствах морской воды из работ [23, 24].

Объект исследования представляется трехслойной физической моделью, содержащей (см. таблицу) нерассеивающий (показатель рассеяния  $\sigma = 0$ ) и слабопоглощающий (показатель поглощения  $\kappa \sim 0,05 \text{ м}^{-1}$ ) глубоководный слой акватории океана, изолированный полупрозрачным оптически неоднородным водно-нефтяным эмульсионным слоем с прилегающей надводной атмосферой, рассматриваемые как отражающие, поглощающие и излучающие среды.

**Оптические модели полупрозрачных ВНЭ (с объемной концентрацией частиц нефтепродуктов  $\sim 0,1\%$  с показателями рассеяния и поглощения  $\sigma \approx \kappa = 0,05 \dots 2,0 \text{ м}^{-1}$ ), нефтяной пленки (с коэффициентом пропускания  $\tau_f = 0,6$  на поверхности океана) и чистой морской воды с загратами теплоты на испарение  $q_v$**

Оптические модели рассеивающих $M(\kappa/\sigma - A\%)$ и нерассеивающих сред	Обозначение соответствующих оптической модели графиков на рис. 2 и 3	$\kappa, \text{ м}^{-1}$	$\sigma, \text{ м}^{-1}$	Коэффициент объемного отражения (альбедо) полубесконечного слоя $H_\infty$ $A = r(H \rightarrow \infty)$	Толщина полубесконечного плоского слоя с максимальным объемным коэффициентом отражения $A$ ( $\tau < 1\%$ ) $H_\infty, \text{ м}$	Толщина слоя с коэффициентом пропускания $\tau = 10\% H_{\tau=0,1}, \text{ м}$
<i>Поглощающая и рассеивающая ВНЭ с частичной экранировкой испарения <math>(q_v)_W = 12,5 \text{ Вт/м}^2</math></i>						
$M1(1/1 - 27)$	кривая 1 (рис. 3)	1	1	0,268	1,83	1,28
$M12(1/2 - 38)$	—	1	2	0,382	1,02	0,97
$M2(0,5/0,5 - 27)$	кривые 1, 2 и 3	0,5	0,5	0,268	3,43	1,88
$M21(0,5/1 - 38)$	—	0,5	1	0,382	1,91	1,59
$M3(0,25/0,25 - 27)$	кривые 3 и 4	0,25	0,25	0,268	10,15	5,19
$M4(0,05/0,05 - 27)$	кривые 5 и 6	0,05	0,05	0,268	49,52	26,15
<i>Поглощающая и нерассеивающая сплошная нефтяная пленка, препятствующая испарению <math>(q_v)_{fW} = 0</math></i>						
$M_{fW}$	кривая 5 (рис. 3)	$\gg 0,05$	0	0,268*	—	—
<i>Слабо поглощающая и нерассеивающая морская вода с естественными затратами теплоты на испарение <math>(q_v)_{cW} = 25 \text{ Вт/м}^2</math></i>						
$M_{cW}$	кривые 7 и 8, 4	0,05	0	0,07*	—	44,53

\* — поверхностное отражение океана.

Этой модели соответствует задача об экранировании водной акватории теплоизолирующими (теплозащитными или терморегулирующими) покровами (покрытиями), состоящими из селективно рассеивающих, поглощающих и излучающих органических веществ. В связи с незначительным числом прямых экспериментальных измерений оптических и терморadiационных характеристик для морской воды и водно-нефтяной эмульсии принята их модельная оценка по данным об альбедо для чистого и загрязненного океанов. По имеющимся в литературе данным указанные величины не превышают соответственно 10 % и 20...30 % [4, 19, 23, 24]. Тогда для чистого океана достаточно рассмотреть оптическую модель проникающего солнечного излучения, ослабляемого с глубиной по закону Бугера, с увеличенным граничным отражением за счет вспененной поверхности океана. Оптические модели полупрозрачных водно-нефтяных эмульсий с концентрацией частиц нефтепродуктов  $\sim 0,1\%$  определяются объемным отражением (при незначительном граничном отражении по закону Френеля), вызванным инородными рассеивающими и поглощающими частицами нефтепродуктов с определенной функцией их распределения по размерам, сравнимым с длиной волны проникающего излучения в видимом и ближнем ИК-диапазонах спектра, т.е. до  $\lambda \sim 1 \dots 2$  мкм. При этом необходимо учитывать и рассеянную компоненту, обусловленную взаимодействием солнечного излучения с флуктуациями плотности, определяемыми возмущениями водной среды. Тогда характеристики ослабления излучения за счет рассеяния и поглощения можно рассматривать как эффективные и использовать как феноменологические параметры для оценки функции поглощенной ВНЭ энергии излучения [8, 13–17, 27].

Принятые оптические характеристики морской воды приведены в таблице: для чистой воды показатели поглощения и рассеяния сравнимы по величине —  $\sigma \approx \kappa = 0,05 \text{ м}^{-1}$  ( $0,05 \dots 2,0 \text{ м}^{-1}$  — с учетом загрязнения морской воды инородными частицами, например, ВНЭ) [23]. Сплошная нефтяная пленка характеризуется коэффициентами пропускания  $\tau_f = 0,6$  и отражения  $r_f = 0,27$ . Для исследования теплового режима океана теплофизические характеристики чистой и загрязненной морской воды были приняты одинаковыми:  $\rho = 1100 \text{ кг/м}^3$ ;  $c_p = 3700 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ ;  $K_T = 0,5 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ .

Подповерхностный слой ВНЭ может частично препятствовать испарению вплоть до полной экранировки сплошной нефтяной пленкой невозмущенной водной поверхности с определенными (модельными) затратами теплоты на испарение. Последние были выбраны из оценок составляющих интегрального теплового баланса системы

атмосфера–земная поверхность. При плотности потока солнечного излучения  $750 \text{ Вт/м}^2$  примерно  $500 \text{ Вт/м}^2$  поглощается и отражается подстилающей поверхностью океана, а оставшаяся треть затрачивается на испарение [4, 18, 19, 22, 23]. Так как затраты на нагрев воды не менее чем на порядок превышают теплоту ее испарения, то в граничных условиях приняты энергетические затраты на испарение для чистой морской воды  $q_v = 25 \text{ Вт/м}^2$ , а по мере увеличения концентрации ВНЭ до состояния сплошной пленки значение  $q_v$  стремится к нулю.

Предлагаемые оптические модели классифицируются по выражению  $M(\sigma/\kappa - A)$  (см. таблицу). Вводимое значение объемных показателей рассеяния  $\sigma$  и поглощения  $\kappa$  имеет традиционную в оптике трактовку [8, 10–17] как доля рассеянной (поглощенной) энергии на единицу длины плоскопараллельного слоя ослабляющей излучение среды. В рамках микроскопической теории рассеивающих сред Г. Ми показатели рассеяния (поглощения) представляются интегральными величинами по нормированным сечениям (коэффициентам) рассеяния и поглощения при учете функции распределения полидисперсных частиц с относительным комплексным показателем преломления  $m = |m_2/m_1|$  для частиц наполнителя и его водного связующего. Моделированию оптических параметров в зависимости от структуры посвящены работы [8, 16].

**Математическая модель и метод решения.** Для расчета переноса излучения в поглощающей и рассеивающей среде, соответствующей принятым оптическим моделям чистой воды со слабым рассеянием и загрязненной светорассеивающей водно-нефтяной эмульсией, использовано двухпотокое приближение для уравнения переноса излучения, согласно которому результирующий поток излучения представлен двумя потоками — в направлениях распространения падающего ( $q_{\lambda 1}$ ) и отраженного ( $q_{\lambda 2}$ ) излучения [8, 16, 23]:

$$\frac{dq_{\lambda 1}(x)}{dx} = -q_{\lambda 1}(x)(\sigma_{\lambda} + \kappa_{\lambda}) + \frac{\sigma_{\lambda}}{\sigma_{\lambda} + \kappa_{\lambda}} q_{\lambda 2}(x); \quad (1)$$

$$\frac{dq_{\lambda 2}(x)}{dx} = q_{\lambda 2}(x)(\sigma_{\lambda} + \kappa_{\lambda}) - \frac{\sigma_{\lambda}}{\sigma_{\lambda} + \kappa_{\lambda}} q_{\lambda 1}(x). \quad (2)$$

В порядке приближения спектральной и температурной зависимостью оптических характеристик пренебрегается, а также не учитывается влияние турбулентного перемешивания верхнего слоя океана. Угловые характеристики рассеянного излучения характеризуются однонаправленной индикатрисой рассеяния с долей рассеяния в направлении, обратном распространяющемуся излучению, не менее 90–100%. Тогда под показателями поглощения и рассеяния понимаются нормированные сечения поглощения и рассеяния, проинтегрированные по

полному телесному углу, но рассматриваемые в одномерном приближении. В рамках двухпоточкового приближения использованы следующие выражения для феноменологических параметров, характеризующих оптические свойства среды:

$$b = (\kappa^2 + 2\sigma\kappa)^{1/2} \quad (3)$$

— для показателя ослабления светорассеивающей среды и

$$A = (b - \kappa)/(b + \kappa) \quad (4)$$

— для альбедо (коэффициента отражения) полубесконечного слоя.

Решение уравнения переноса излучения в двухпоточковом приближении позволило рассчитать характеристики светового поля и коэффициенты отражения  $r(x)$ , пропускания  $\tau(x)$  и поглощения  $a(x)$  плоского оптически неоднородного слоя чистой морской воды и водно-нефтяной эмульсии толщиной  $x$  [8, 9, 16]:

$$r(x) = [1 - \exp(-2bx)]A/[1 - A^2 \exp(-2bx)]; \quad (5)$$

$$\tau(x) = (1 - A^2) \exp(-bx)/[1 - A^2 \exp(-2bx)]; \quad (6)$$

$$a(x) = (1 - A)[1 - \exp(bx)]/[1 + A \exp(-bx)], \quad (7)$$

удовлетворяющие условиям нормировки

$$a(x) + r(x) + \tau(x) = 1.$$

Модель для количественных расчетов и оценок температурного состояния рассматриваемой природной системы представляет замкнутую систему уравнений и граничных условий, содержащую:

— нелинейное одномерное дифференциальное уравнение теплопроводности с функцией теплового источника, коэффициенты которого включают в себя ряд оптических параметров морской воды согласно упомянутым выше физическим моделям;

— зависимость поглощения солнечного излучения в воде от глубины для так называемого в океанологии коротковолнового диапазона длин волн;

— сложное нелинейное граничное условие на поверхности воды, учитывающее отражение в коротковолновом (для непрозрачных объектов) и переизлучение в длинноволновом (до 8...10 мкм) диапазонах спектра с учетом значений коэффициента пропускания солнечного излучения через сплошную нефтяную пленку, а также конвективную составляющую теплового потока.



В общем виде лучистый теплоперенос с известной функцией  $F(x, t, \kappa, \sigma, q_0)$  поглощенной энергии и энергетическими затратами на фазовые переходы на поверхности облучаемого водно-эмульсионного слоя представляется нелинейным уравнением

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) + F, \quad (8)$$

где

$$F(x) = \frac{q_0 (1 - A) b}{1 - A^2 \exp(-2bH)} \{ \exp(-bx) - \exp[b(x - 2H)] \}. \quad (9)$$

Условие теплообмена на поверхности воды ( $x = 0$ ) учитывает внешнюю конвекцию, воздействие длинноволновых составляющих потоков излучения океана и атмосферы, а также компонент солнечно-го излучения, для которых океан является непрозрачной средой:

$$-K_T \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_T (T_A - T) + \varepsilon_{ef} c_0 (T_A^4 - T^4) + q_0^{UR} + q_0^{UV} - \rho L_v x'_v, \quad (10)$$

где  $\varepsilon_{ef} = (1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1)^{-1}$  — эффективный коэффициент черноты для взаимно облучаемой воздушной среды и поверхности океана с коэффициентами черноты  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  в длинноволновом диапазоне;  $q_0^{UR}$ ,  $q_0^{UV}$  — компоненты суммарного потока излучения Солнца  $q_0$  соответственно в ближней УФ и ИК областях спектра;  $\alpha_T$  — коэффициент теплоотдачи для границе раздела с атмосферой;  $c_0$  — постоянная Стефана–Больцмана;  $K_T$  — коэффициент теплопроводности;  $\rho$  — плотность морской воды;  $x'_v$  — скорость движения границы испарения;  $L_v$  — теплота испарения воды.

На тыльной границе плоского слоя чистой морской воды при  $x = H = 50$  м полагаем

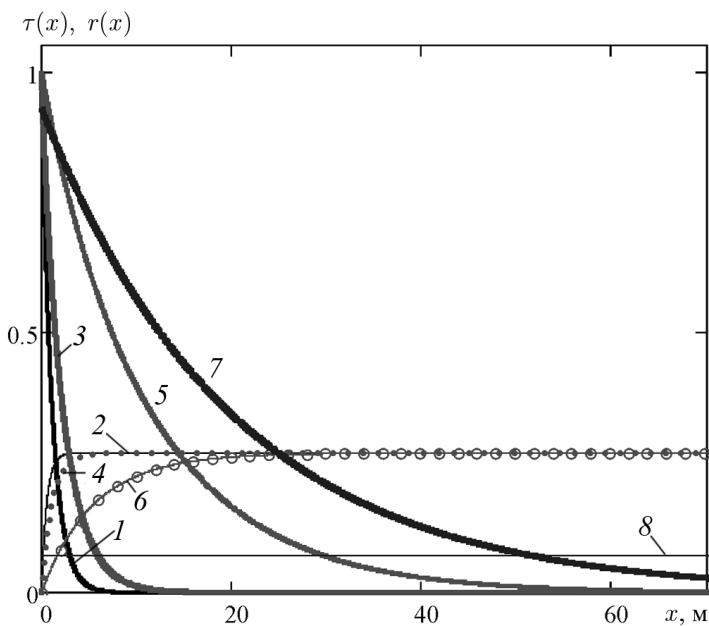
$$-\frac{dT}{dx} = -0,04/K_T. \quad (11)$$

Температурное распределение в среде в начальный момент времени принимается линейным с градиентом  $-0,04$  град/м и температурой на поверхности  $22^\circ\text{C}$ .

**Анализ результатов.** Модельные расчеты проводились для нескольких сценариев сочетаний оптических характеристик пленки (эмульсии) на поверхности морской воды, ее оптических и теплофизических параметров, а также условий теплообмена на границе раздела вода–воздух.

На рис. 2 приведены графики зависимости оптических характеристик — коэффициентов отражения и пропускания — для различных типов ВНЭ и чистого океана.

Для чистой морской воды имеет место ослабление проникающего солнечного излучения по закону Бугера (кривая 7); отражательная

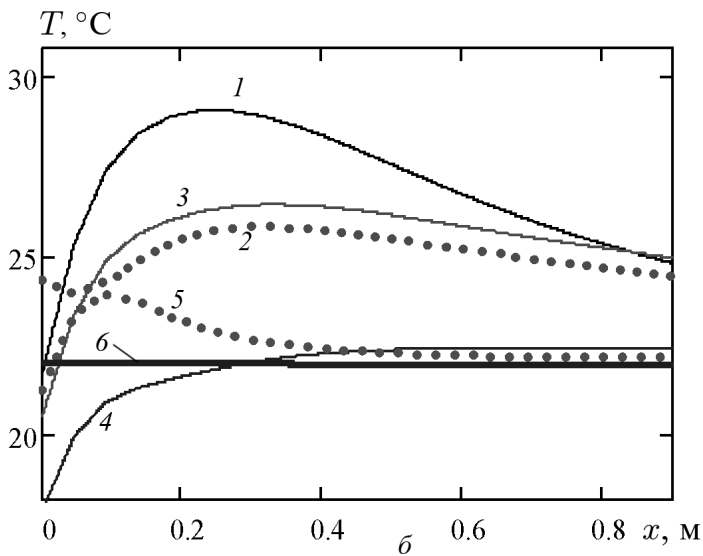
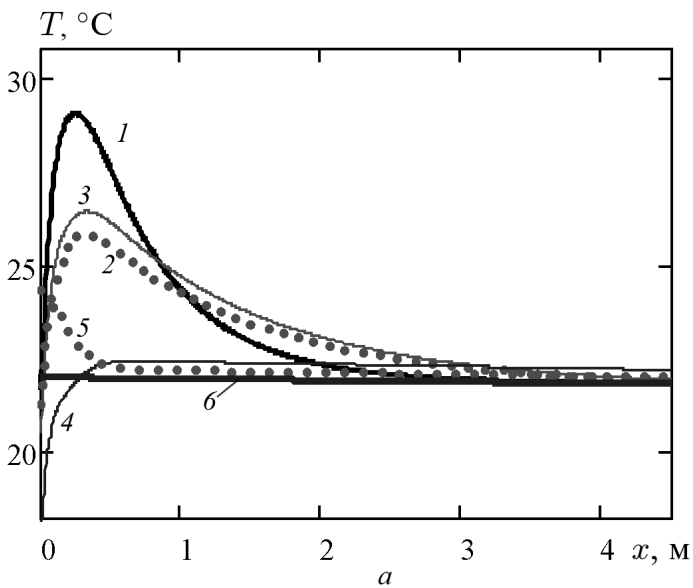


**Рис. 2.** Зависимость коэффициентов пропускания  $\tau(x)$  и отражения  $r(x)$  от толщины  $x$  подповерхностного слоя океана для оптических моделей (см. таблицу):

1, 2 –  $M2(0,5/0,5 - 27)$ ; 3, 4 –  $M3(0,25/0,25 - 27)$ ; 5, 6 –  $M4(0,05/0,05 - 27)$ ; 7, 8 –  $MCW$

способность границы раздела двух сред определяется постоянной величиной 8...10%, в которой не более 2–5% (в зависимости от угла падения) соответствует френелевскому отражению, а остаток — отражению от вспененной поверхности океана. Это поверхностное отражение не зависит от толщины слоя вещества (кривая 8). Если в такой воде имеется рассеивающая примесь с показателем рассеяния, равным показателю поглощения,  $\kappa_4 = \sigma_4 \approx \kappa_{CW} = 0,05 \text{ м}^{-1}$ , то отражение уже является функцией толщины, возрастает до  $\sim 0,27$  на глубине  $\sim 0,2 \text{ м}$  (так называемая толщина полубесконечного слоя) и с ростом толщины больше не изменяется. Для других вариантов рассеивающих слоев ВНЭ за счет подбора показателей поглощения и рассеяния удастся изменить поглощение в слое морской воды, но альbedo толстого полубесконечного слоя в данных расчетах одинаковое, характерное для загрязненного океана.

На рис. 3 приведены расчетные распределения температуры по глубине, формируемые в толще морской воды на третьи сутки ( $t_{day} = 24 \text{ ч}$ ) в астрономические полдень  $t = 2,25 \cdot t_{day}$  и полночь  $t = 2,75 \cdot t_{day}$  при синфазных колебаниях температуры атмосферы от 17 до 27 °С и потока солнечного излучения от 500 Вт/м<sup>2</sup> до 0. Проведены расчетные оценки температурных распределений в толще океана, загрязненного



**Рис. 3.** Расчетные нестационарные распределения температуры загрязненной и чистой морской воды в штиль при радиационно-конвективном воздействии для 50-метровой толщи в мелком (а) и укрупненном (б) масштабах на третьи сутки в астрономические временные периоды:

полночь ( $t_n = 2,75 \cdot t_{day}$ ) — для оптических моделей загрязненного ВНЭ  $M1(1/1 - 27)$  (кривая 1) и  $M2(0,5/0,5 - 27)$  (кривая 3); моделей чистой океана  $MCW$  (кривая 4) и покрытого нефтяной пленкой  $MfW$  (кривая 5);

полдень ( $t_d = 2,25 \cdot t_{day}$ ) — для модели  $M2(0,5/0,5 - 27)$  (кривая 2) с заданным начальным распределением температуры (кривая 6)

ВНЭ (кривые 1–3); чистой морской воды (кривая 4) и покрытой тонкой нефтяной пленкой (кривая 5).

На графиках представлены температурные распределения для двух оптических моделей ВНЭ. Для сильно поглощающей ВНЭ с показате-

лем поглощения  $\kappa = 1 \text{ м}^{-1}$  оптической модели  $M1(1/1 - 27)$  рассчитан температурный профиль  $T(x, 2,75 \cdot tday)$  (кривая 1). Для слабопоглощающей ВНЭ ( $\kappa = 0,5 \text{ м}^{-1}$ ) оптической модели  $M2(0,5/0,5 - 27)$  рассчитаны температурные профили  $T(x, 2,25 \cdot tday)$  и  $T(x, 2,75 \cdot tday)$  (кривые 2 и 3).

Для оптической модели  $M2(0,5/0,5 - 27)$  наибольшая температура  $\approx 24^\circ\text{C}$  поверхности ( $x = 0$ ) в полдень характеризуется температурным распределением  $T(x, 2,25tday)$  (кривая 2) с присутствием так называемого холодного скин-слоя (толщиной до 0,2 м) относительно подповерхностного максимума температуры  $\approx 26^\circ\text{C}$ . Для той же модели температура поверхности океана ТПО (SST) снижается до  $\approx 21^\circ\text{C}$  на температурном профиле  $T(x, 2,75 \cdot tday)$  (кривая 3) к полуночи  $t = 2,75$  сут. Толщина скин-слоя практически не меняется, но сам скин-слой более холодный (на несколько градусов), а подповерхностный температурный максимум даже возрастает примерно на один градус до  $\approx 27^\circ\text{C}$  за счет стока к поверхности океана кондуктивного потока теплоты, вызванного ночным выхолаживанием за счет излучения в длинноволновой области спектра и конвекции, что полностью соответствует экспериментальным данным [4, 18, 19, 23].

Рост поглощения для ВНЭ модели  $M1(1/1 - 27)$  приводит к более существенному росту температуры (кривая 1) и перегреву в подповерхностной области в сравнении с ТПО модели  $M2(0,5/0,5 - 27)$  (кривая 2). Но проникающий в толщу более загрязненной морской воды поток излучения уменьшается сильнее в сравнении с ВНЭ модели  $M2(0,5/0,5 - 27)$  с меньшим ослаблением излучения, чем в модели  $M1(1/1 - 27)$ , что приводит к снижению температуры уже на глубине  $\sim 1$  м. Таким образом, для более чистого океана температура на поверхности будет ниже, а прогрев глубинных слоев — сильнее.

В отличие от традиционной океанологии, где не рассматривалось влияние на температурный режим одновременно и поглощения и рассеяния, предлагаемый подход позволяет по-новому рассмотреть физический механизм нагрева океана, что имеет принципиальное значение. Проведенные расчеты показывают, что усиление рассеяния вызывает смещение максимума температурного профиля к поверхности при слабом изменении самой температуры, а рост поглощения способствует ее увеличению.

Суточные колебания температуры атмосферы и солнечного потока обуславливают осцилляции температуры на поверхности океана, которые меняют не только значение градиента температуры, но и его знак. К ночи имеет место сток кондуктивный сток теплоты к поверхности из перегретой поверхностной области, а к полудню наблюдается естественная инверсия температурных профилей  $T(x, 2,25 \cdot tday)$  и

$T(x, 2,75 \cdot t_{day})$  (модель  $M2(0,5/0,5 - 27)$ , кривые 2 и 3) в подповерхностной области.

Температурный профиль для толщи морской воды, теплоизолированной сплошной нефтяной пленкой, оптической модели  $MfW$  качественно повторяет структуру температурного поля для ВНЭ, но при слабом рассеянии нижележащих горизонтов чистой морской воды обуславливает меньшие температуры разогрева подповерхностной области и ТПО (SST).

В случае сплошной полупрозрачной нефтяной пленки (кривая 5) имеет место рост поглощенного (до 30 %) и отраженного (до 60 %) потоков солнечного излучения; при этом поток солнечного излучения, воздействующий на глубинные слои морской воды, уменьшается до  $\approx 200 \text{ Вт/м}^2$  (что существенно меньше поглощенного потока для чистой воды  $\approx 470 \text{ Вт/м}^2$ ). Для этого случая характерен интенсивный прогрев океана вблизи поверхности. При загрязнении океана ВНЭ (кривые 1, 2) температура морской воды может достигать  $30^\circ\text{C}$  после трехсуточного прогрева в штиль, причем пропорционально росту не только поглощения, но и рассеяния. Для водно-нефтяной эмульсии и нефтяной пленки, частично экранирующих проникающий поток солнечного излучения, на глубинах  $x > 3 \dots 5$  м температура океана (см. рис. 3, а, кривые 1–3, 5 меньше, чем в случае прогрева чистой воды ( $T(x) < T_0(x)$ ). Таким образом, имеет место снижение прогрева глубинных слоев океана на фоне перегрева подповерхностной области и роста ТПО (SST).

**Выводы.** При длительном нагреве океана солнечным излучением температура воздуха также возрастает за счет увеличенного альбедо загрязненной воды и конвективного стока теплоты в атмосферу. Как следует из полученных результатов, если предлагаемая оптическая модель верна, то зона аномального прогрева загрязненной морской воды (и зарождения антициклонов) не только активно расширялась, но и продвигалась на восток вместе с Гольфстримом (см. рис. 1, 4-я полоса обложки). Это могло привести к формированию над обширной поверхностью океана обезвоженных конвективных потоков — воздушных атмосферных течений.

Гольфстрим — это источник огромного количества влаги (за счет испарения) и теплоты для атмосферы. В зоне его действия можно выделить так называемые энергоактивные зоны океана, в которых суммарное выделение теплоты в атмосферу на порядок превышает среднеширотные оценки. Еще в советские годы академик Г.И. Марчук сформулировал концепцию, согласно которой именно эти зоны играют ключевую роль в проблеме долгосрочного прогноза погоды и короткопериодных колебаниях климата [1, 2, 5].

На рис. 4 (см. 4-ю полосу обложки) показана схема глобально-го перераспределения тепловых потоков в атмосфере и океане при масштабном техногенном загрязнении нефтью водной поверхности. Основной вклад в нагрев океана дает поток солнечного излучения (желтые стрелки), до 95 % которого поглощается в толще чистой морской воды до глубины 60...80 м [4, 18, 23]. Процессы конвективного (синие стрелки) и терморadiaционного теплообмена в длинноволновом диапазоне (красные стрелки) в течение суток или подогревают океан, или его выхолаживают, что вызывает изменение температуры поверхности и появление скин-слоя, изменяющегося по размерам и перепадам температуры. Вклад терморadiaции и конвекции в зависимости от времени суток и температуры океана и атмосферы может изменяться в пределах до  $\pm 30\%$ .

Для загрязненной морской воды (см. правую часть рис. 4) имеет место существенный рост рассеяния и поглощения солнечного излучения в приповерхностном слое. Это обуславливает как увеличение отраженного (поверхностью и объемом водной толщи) солнечного потока (до 30 %), так поглощенного (до 35 % в загрязненной подповерхностной области). Но вглубь океана распространяется не более 60 % солнечного потока, вследствие чего прогрев морской воды на глубине значительно уменьшается. Таким образом, появление нефтяного загрязнения на поверхности океана приводит к кардинальной перестройке теплового режима системы океан-атмосфера, а именно:

- происходит дневное экранирование солнечного прогрева морской воды по глубине и значительный прогрев ее поверхностного слоя при интенсивном терморadiaционном и конвективном выхолаживании (особенно в ночные часы), усиливающимся в штормовую погоду;

- рост температуры по глубине морской воды с загрязненной поверхностью уменьшается, что приводит к формированию более холодной водной толщи в океане;

- интенсивность испарения воды с загрязненной поверхности существенно снижается, резко возрастая при сильном волнении моря и штормовой погоде;

- имеет место дополнительный нагрев атмосферы за счет увеличенного отражения солнечной радиации от загрязненной и перегретой воды, а также роста терморadiaционных и конвективных потоков.

За последние 10-20 лет оценки водно-теплового баланса отдельных участков мирового океана и суши показывают, что катастрофические потери или существенный избыток среднемесячных осадков не согласуются с традиционными моделями колебаний климата и погодных условий как результатов действия известных циклонов или антициклонов [1, 2, 22, 23]. На эти несоответствия еще указывал известный

русский ученый А.С. Монин: “. . . Расшифровка данных об изменениях климата все в возрастающей мере требует использования физических методов” [2].

Могут реализоваться два сценария циркуляции конвективных воздушных потоков: с дефицитом или избытком влаги, что обусловит либо продолжительную засуху на пространстве распространения обезвоженных воздушных масс, либо в случае возникновения циклона — усиление его энергии и подпитку водной массой.

В первом случае перегретые пограничные слои океана (приповерхностный воздушный и поверхностный водный) могут быть причиной формирования в атмосфере специфических аномально перегретых конвективных потоков, что в свою очередь способствует поддержанию очага тепловыделения в средней и верхней тропосфере (термодинамические условия зарождения антициклонов). При этом отрицательный водный баланс на морских акваториях может вызываться заторможенным механизмом испарения воды океана или внутренних морей.

Во втором случае перегретый слой воды в результате теплообмена с атмосферой постепенно охлаждается и при зарождении урагана отдает ему свою массу, что существенно усиливает мощность урагана. Происходит интенсивная диссипация (рассеяние, сброс) энергии перегретой воды с поверхности океана посредством ураганов, набирающих силу над акваторией океана, которые увеличивают свою кинетическую энергию и уносят громадную массу воды из атмосферы, в частности из Атлантики, на американский континент. Усиление ураганов по частоте и энергии сопровождается сбросами из атмосферы значительного объема водной массы, которая в обычных условиях достается другим регионам суши в виде циклонов.

Если предлагаемая модель получит свое подтверждение (при будущем проведении экспериментальных измерений оптических характеристик и температурного режима), то, значит, приход антициклонов на равнинные и удаленные от моря и гор территории суши Европы действительно способствовал установлению там аномально жаркой погоды — антициклональной устойчивой во времени и пространстве зоны с высоким атмосферным давлением, препятствующим продвижению циклонов из северной части Атлантики и Ледовитого океана. Именно здесь наблюдались (в том числе и в России летом 2010 г.) жаркая погода и летняя засуха.

В свою очередь, “запертые” циклоны из северной Атлантики и Ледовитого океана один за другим за короткое время обрушили все запасы своей влаги на ограниченную площадь от Западной Европы до Среднего Востока, вызвав там разрушительные наводнения.

Перегрев верхнего слоя морской воды под нефтяной пленкой ведет к интенсивному оттоку теплоты из воды в атмосферу, вследствие чего происходит охлаждение нижележащей водной толщи океана. Охлаждение океана приведет уже в ближайшее время к значительному уменьшению испарения воды в Атлантике.

В обычных условиях это уменьшение составляет около 120 тыс. км<sup>3</sup>/год; теперь, судя по приближенным оценкам, оно может существенно понизиться. Более охлажденные воздушные потоки не смогут достичь восточных регионов Европы, что будет вызывать в Западной Европе обильные дожди и снежные циклоны, а в Восточной Европе дефицит влаги летом и малоснежные зимы, в период которых вся надежда будет на аккумулярующие осадки с северо-восточных регионов. С высокой степенью вероятности это повлечет за собой дефицит осадков и недобор осенней влаги в почве в Восточной Европе. Уже сейчас наблюдается катастрофическое обмеление рек в России (и даже Волги). При уже образовавшемся летнем дефиците влаги в почве это неминуемо приведет к повышению среднелетних температур воздуха и засухам в будущие летние периоды, а также к малоснежным и суровым зимам на обширных территориях Европы.

Дефицит теплоты в глубине океана вдоль по Гольфстриму может привести к понижению его температуры. В обычных условиях Гольфстрим, как и океан, прогревается почти равномерно до глубины 80...100 м (так называемый квазиоднородный слой), и приносимый им огромный объем нагретой воды в северную Атлантику и западный сектор Ледовитого океана формирует там относительно мягкий климат. Охлаждение Гольфстрима чревато уже в ближайшем будущем понижением среднезимних температур воздуха в странах Западной Европы и Скандинавии. Может быть, даже в течение нескольких лет зимы будут не холоднее обычного, но с обильными осадками в Западной Европе и будут малоснежными в ее континентальных районах. Это может способствовать увеличению ледового покрова на севере РФ в обычно незамерзающем Баренцевом море и изменить структуру эколого-экономических характеристик обширных регионов.

*Автор признателен профессору М.С. Крассу и доценту О.В. Сидорову за полезное обсуждение различных аспектов настоящей работы.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Н и г м а т у л и н Р. И. Океан: климат, ресурсы, природные катастрофы // Вестник РАН. – 2010. – Т. 80. – № 8. – С. 675–693.
2. М о н и н А. С. Климат как проблема физики // Успехи физических наук. – 2000. – Т. 70. – № 4. – С. 419–445.



3. Стратегический прогноз изменений климата Российской Федерации на период до 2010–2015 гг. и их влияния на отрасли экономики России. – М.: Федеральная служба по гидрометеорологии и контролю окружающей среды (Росгидромет). 2006.
4. Keenlyside N. Tsuang B. -J. Final report: Scale interactions in a coupled climate model / Advancing understanding of the upper ocean diurnal cycle and its relevance to climate. Joint DFG-NSC project: 446 TAI 113/33/0-1. [http://www.ifm-geomar.de/fileadmin/personal/fb1/me/nkeenlyside/Reports/DFG\\_finalreport.pdf](http://www.ifm-geomar.de/fileadmin/personal/fb1/me/nkeenlyside/Reports/DFG_finalreport.pdf)
5. Малинин В. Н. Разлив нефти в Мексиканском заливе. РГГМУ. – Санкт-Петербург. 2010. <http://online812.ru/2010/09/28/012/pdf/>
6. NOAA (National Oceanic @ Atmospheric Administration) / ESRL (Earth System Research Laboratory) Physical Science Division. <http://blog.agu.org/geospace/2010/08/25/blocked-up-weather/>
7. Красс М. С. Математические модели и численное моделирование в гляциологии. – М.: МГУ, 1981. – 140 с.
8. Красс М. С., Мерзликин В. Г. Радиационная теплофизика снега и льда. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 261 с.
9. Красс М. С., Геворкян С. Г., Мерзликин В. Г., Товстоног В. А. Методика расчета радиационных и температурных полей снежных и ледяных массивов // Материалы гляциологических исследований. – 2000. – Вып. 90. – С. 142–147.
10. Howe J. T., Green M. J., Weston K. C. Сублимирующие объемно отражающие материалы как тепловая защита при совместном воздействии конвективного и интенсивного лучистого потоков тепла // AAIA Journal. – 1973. – Vol. 11, no. 7. NASA Ames research center. Moffet Field, Calif. USA.
11. Daby F. W. High intensity laser induced vaporization and explosion of solid material // IEEE Journal of Quantum Electronics. – 1972. – Vol. QE-8, no. 8. USA.
12. Петров В. П., Рябцев Е. И., Сутугин В. Г., Мерзликин В. Г. Оптические свойства высокоотражающей керамики // Тематический сб. Вопросы авиационной науки и техники. Сер. Авиационные материалы. – 1989. – С. 39–43.
13. Товстоног В. А. Анализ теплообмена в светорассеивающих материалах, нагреваемых излучением // Физика и химия обработки материалов. – 1985. – № 3. – С. 35–40.
14. Товстоног В. А. Теплофизика рассеивающих материалов: прикладные проблемы и решения // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2000. – № 3. – С. 67–85.
15. Manara J., Arduini-Schuster M., Rätzer-Scheibe H.-J., Schulz U. Infrared-optical properties and heat transfer coefficients of semitransparent thermal barrier coatings // Surface and Coatings Technology. – 2009. – Vol. 203. – Issue 8, 15 January. – P. 1059–1068.
16. Merzlikin V., Gutierrez Ojeda M., Sidorov O., Timonin V. New selectively absorbing and scattering heat-insulating coatings of the combustion chamber for the low-heat-rejection diesel. SAE Techn. Pap. Ser., No. 07M-171, 2007.
17. Siegel R. Internal Radiation Effects in Zirconia Thermal Barrier Coatings // AIAA J. Thermophysics Heat Trans. – 1996. – Vol. 10, no. 4. – P. 707–709.
18. Федоров К. Н., Гинзбург А. И. Приповерхностный слой океана. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 304 с.
19. Чавро А. И. Физические основы и методы определения температуры поверхности океана. – М., 1990. – 242 с.
20. Вершинский Н. В., Волков Ю. А., Соловьев А. В. О вертикальной микроструктуре тонкого поверхностного слоя океана // ДАН СССР. – 1981. – Т. 256. – № 3. – С. 694–698.
21. Wells A. J., Cenedese C., Farrar J. T., Zappa C. J. Variations in ocean surface temperature due to near-surface flow: straining the cool skin layer // J. of Phys. Oceanography. – 2009. Vol 39. – P. 2685–2710.

22. G r a s s l H. The dependence of the measured cool skin of ocean on wind stress and total heat flux // *Boundary-Layer Meteorology*. – 1976. – Vol. 10. No. 4. – P. 465–474.
23. Д о р о н и н Ю. П. Физика океана. СПб., 2000. – 287 с.
24. Ш и ф р и н К. С., И о н и н а С. Н. Тепловое излучение и отражение волнующейся поверхности моря в микроволновой области // *Труды ГГО*. – 1968. – Вып. 222. – С. 22–48.
25. А р т е м ь е в А. Н. Взаимодействие атмосферы и подстилающей поверхности на антарктическом плато // *Тр. САЭ*, 1976. – Т. 66. – 71 с.
26. K o h G., J o r d a n R. Sub-surface melting in seasonal snow cover // *J. of Glaciology*. – 1995. – Vol. 41. No. 139. – P. 474–482.
27. Т о в с т о н о в В. А., М о с а л о в Ф. Ф., М е р з л и к и н В. Г. Постановка и решение задач радиационно-кондуктивного теплообмена в многослойных рассеивающих средах // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*. – 2008. – № 1. – С. 12–29.

Статья поступила в редакцию 17.01.2011

Владимир Гаврилович Мерзликин родился в 1952 г., окончил Московский инженерно-физический институт в 1975 г. Канд. техн. наук, доцент МГТУ “МАМИ”. Автор более 70 научных работ в области теплообмена излучением, тепловой защиты, процессов теплообмена в природной среде.

V.G. Merzlikin (b. 1952) graduated from the Moscow Institute for Engineering and Physics in 1975. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of the Moscow State Technical University “MAMI”. Author of more than 70 publications in the field of study of radiation heat exchange thermal protection, heat exchange processes in nature.

