

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ ПРИЧИН КОРОТКОПЕРИОДНЫХ АНОМАЛИЙ КЛИМАТА

Рассмотрены физическая и математическая модели техногенных причин возникновения климатической аномалии лета 2010 г. Численные расчеты показали, что загрязнение поверхности океана нефтью обуславливает изменение оптических свойств морской воды, что вызывает перестройку тепловых потоков солнечного излучения в атмосфере и воде.

Ключевые слова: аномалии климата; загрязнение; оптические свойства среды; физическая модель; математическая модель.

1. Климатические аномалии на Русской равнине и в Атлантическом океане. В период аномально высоких температур лета 2010 г. разница температур зима–лето для Центральной России превысила 60°. Первые за все время инструментальных измерений был отмечен рост средних летних температур не на 1–2 градуса, а сразу на 6–8°C. «Большая русская жара – 2010» перекрыла пик «Большой европейской тепловой волны – 2003». Если низкие температуры сравнительно нетрудно переносятся человеком (так как большинство физико-химических процессов экзотермические и легко реализуются), то наличие повышенных и длительных по срокам летних температур до 35–40°C плохо компенсируется в обычных условиях какими-либо эндотермическими процессами. Именно поэтому такая длительная жара стала для России катастрофой. Второй регион на планете, отмеченный рекордными температурами, – это район Северной Атлантики. Температура поверхности океана (ТПО или SST по европейской терминологии) превысила все показатели за 150 лет метеорологических наблюдений [1, 2]. Это способствовало росту вероятности зарождения ураганов с середины августа до середины октября.

Эти резкие температурные изменения за короткий период объяснить естественными климатическими колебаниями становится все сложнее, и проблемы антропогенного воздействия на природу становятся все более актуальными. Антропогенный фактор ныне часто становится доминирующим; это обуславливает значительные по простиранию и интенсивности изменения в окружающей среде, что, в свою очередь, заметно снижает устойчивость эколого-экономических систем, приводит к необратимым и даже катастрофическим изменениям в динамике природных процессов и резко меняет привычные условия жизнедеятельности людей на обширных территориях.

Увеличение техногенных катастроф, как правило, связано с интенсивным загрязнением окружающей среды, обусловленным добычей и транспортом больших объемов углеводородного сырья (в частности, нефти). Некоторые публикации указывают, 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 т нефти. Сегодня особо актуальны исследования изменений природной обстановки техногенного происхождения. Поясним важность такой постановки вопроса на недавнем известном событии. В результате катастрофы в Мексиканском заливе в апреле 2010 г. в Атлантический океан было выброшено около 1 млн т сырой нефти за 100 дней ее истечения из поврежденной скважины. Вслед за этим случилось

аномально жаркое лето, затронувшее обширную часть Европы (в том числе и Россию), которое стало причиной катастрофического неурожая и многочисленных чрезвычайных ситуаций (в том числе и демографических). Летняя жара и засуха обернулись непредвиденными трудностями для экономики и населения нашей страны.

Метеорологические условия аномальной жары в Европе, как известно, были обусловлены тем, что в течение примерно двух летних месяцев над восточной половиной Европы (на высоте 8–10 км) располагалась дуга струйного течения изгибом к северу. Это обусловило устойчивый вынос тропического воздуха в данный регион и поддержание очага тепла, развитого по всем высотам, что в свою очередь повлекло за собой формирование стационарного антициклона. Обычно такие дуги (называемые также длинными волнами, или волнами Россби) постепенно смещаются с запада на восток, вызывая смену погоды в умеренных широтах – чередование жары и похолоданий; однако в данном случае этого не произошло. Это явление имело и обратную сторону: интенсивный заток холодных арктических воздушных масс по восточной периферии этой дуги; как следствие, в Западной Сибири прошедшее лето было аномально холодным и дождливым.

Здесь уместно указать на два фактора, определяющих погоду на европейском континенте. Во-первых, Атлантика является «поставщиком» циклонов на европейский континент вследствие интенсивного испарения воды с поверхности океана; во-вторых, основную часть этого испарения дает теплый Гольфстрим, снабжающий теплом западное и северное побережье Европы и атлантический сектор Ледовитого океана.

Разлив нефти в Мексиканском заливе вблизи Гольфстрима уже в августе способствовал появлению загрязнений у восточного побережья США. При ширине Гольфстрима порядка 100 км и общей протяженности его маршрута от Мексиканского залива около 5000 км перенос течением обусловил площадь загрязнения не менее 1 млн кв. км (рис. 1); в центре Северной Атлантики образовалось громадное размываемое нефтяное «пятно» уже далеко вне пределов залива.

Поскольку техногенная катастрофа в Мексиканском заливе является типичной для современных технологий энергообеспечения, необходимо дать ответ на важный вопрос: связана ли климатическая аномалия лета 2010 г. с разливом нефти, т.е. имеет ли она техногенное происхождение. Для этого нам придется воспользоваться результатами и выводами соответствующих физических и математических моделей.

2. Физические модели оптических сред. В 70–80-х гг. прошлого столетия авторами данной работы

был разработан ряд комплексных физических моделей светорассеивающих и поглощающих сред, позволивших сформулировать новые математические модели природных процессов [3, 4] и объяснить ряд наблюдаемых явлений для полярных и высокогорных ледников, а также решить ряд прикладных вопросов, связанных с созданием тепло-, огнезащитных и теплоизолирующих материалов и покрытий различного назначения [5, 6]. Отличительной особенностью указанных исследований явилось изучение сложного теплообмена для оптических неоднородных сред путем совместного решения уравнений теплопроводности и переноса излучения на основе разработанных и апробированных оптических моделей материалов в условиях интенсивного конвективно-радиационного воздействия.

В исследованиях 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 [7–11]. Несмотря на прецизионные измерения подповерхностной температуры океана на глубине с точностью до миллиметра, оценка тепловых режимов водных акваторий ограничивалась применением закона сохранения энергии, а также неполной краевой задачей лучистого теплообмена без детального анализа распространения проникающего солнечного излучения в водной толще. Нередко воздействующий на поверхность океана лучистый поток принимался в виде аддитивной величины потоков солнечного излучения и поглощаемого поверхностью океана излучения атмосферы. Исследование морской воды как среды, обладающей свойствами не только поглощения, но и рассеяния, ограничивалось так называемым параметрическим описанием формирующего теплового баланса [12]. Это обусловило некорректную трактовку наблюдаемого подповерхностного максимума температуры. Указывалось 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. Здесь сказалась неосведомленность океанологов о подобных исследованиях в других областях науки и техники, где были достигнуты значительные результаты. Например, необходимо учитывать эффект формирования подповерхностного температурного максимума в океане при воздействии коллимированных потоков проникающего солнечного излучения в оптически неоднородной среде [13, 14]. 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 не решена. Это связано с различными причинами, одна из которых – необходимость дифференциации эффектов отражения и переизлучения водной средой, на что, впрочем, указывал в своих работах сам К.С. Шифрин [15]. Указанные разработки в России были прерваны в 90-х гг. прошлого века; за рубежом сложный теплообмен для океана также полностью не решен и не получил должного развития.

Подобная ситуация складывалась 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 [16]. Теоретическое обоснование этого эффекта впервые было получено М.С. Крассом и В.Г. Мерзликиным в 1985 г. [17], что позже было экспериментально подтверждено радиозондированием [18].

Океан является сложной средой, в которой имеют место диффузия солей и турбулентное перемешивание, которые существенно усложняют процесс нагрева и его моделирование. Но в первом приближении этими явлениями можно пренебречь, чтобы выявить влияние основных процессов лучисто-кондуктивного нагрева рассеивающей и поглощающей морской среды.

В данной работе рассмотрены новые физические модели водно-теплового баланса акваторий 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 лучистых потоков тепла в видимом, ближнем и среднем инфракрасном диапазонах длин волн потоков солнечного излучения и атмосферы при естественной конвекции. Исходные данные по оптическим свойствам морской воды приведены в таблице.

Объектом исследования является трехслойная физическая модель: пренебрежимо малорассеивающая и слабопоглощающая глубоководная акватория океана; полупрозрачный оптически неоднородный подповерхностный водно-нефтяной эмульсионный слой; прилегающая атмосфера. Все эти три слоя рассматриваются как отражающие, поглощающие и излучающие среды.

В связи с недостатком прямых экспериментальных измерений оптических и терморрадиационных характеристик ВНЭ была принята их модельная оценка, исходя из альбедо для чистого и загрязненного океана. По имеющимся в литературе данным указанные величины не превышают соответственно 10 и 20–30%. 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 ~0,1% определяются объемным отражением (при незначительном граничном отражении по закону Френеля), включающим вклад прежде всего инородных рассеивающих и поглощающих частиц нефтепродуктов с известной функцией их распределения по размерам, сравнимым с длиной волны проникающего излучения в видимом и ближнем ИК-диапазонах длин волн, т.е. до $\lambda \sim 1\text{--}2$ мкм. При этом необходимо учитывать и рассеянную компоненту, обусловленную взаимодействием солнечного излучения с хаотически возмущенной водной средой. Тогда вводимые характеристики ослабления за счет рассеяния и поглощения являются эффективными и позволяют оценить функцию поглощенной ВНЭ лучистой энергии.

Диапазон представленных оптических характеристик для морской воды был выбран следующий: для чистого океана $\sigma \sim \kappa$ равны $0,05 \text{ м}^{-1}$; с учетом загрязнения частицами ВНЭ – $0,05\text{--}2,0 \text{ м}^{-1}$. Сплошная нефтяная пленка характеризуется коэффициентами пропускания $\tau_f = 60\%$ и отражения $r_f = 27\%$. Для исследования влияния объемного отражения и поглощения загрязненного ВНЭ океана теплофизические характеристики чистой и загрязненной морской воды были приняты одинаковыми: $\rho = 1\,100 \text{ кг/м}^3$; $C_p = 3\,700 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$; $K_T = 0,5 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$.

Подповерхностный слой ВНЭ может частично препятствовать испарению вплоть до полной экранировки сплошной нефтяной пленкой на невозмущенной водной поверхности с модельными затратами тепла на испарение q_v от 25 Вт/м^2 (чистая водная поверхность) до нуля по мере увеличения концентрации ВНЭ до пленочного состояния. Указанные величины были выбраны из оценок составляющих интегрального теплового баланса атмосфера – земная поверхность. Из 750 Вт/м^2 солнечного потока излучения примерно 500 Вт/м^2 затрачивается на взаимодействие с подстилающей поверхностью суши и океана, а треть – на испарение. Так как затраты на нагрев воды не менее чем на порядок превышают теплоту ее испарения, то в граничных условиях была принята величина на порядок меньше, чем общие тепловые потери в 250 Вт/м^2 на нагрев и испарение поверхностного слоя.

Для разработки оптических моделей светорассеивающей водно-нефтяной среды использовано двухпотокное приближение решения уравнения переноса излучения. Была рассмотрена однонаправленная индикатриса рассеяния. Тогда под показателями поглощения и рассеяния понимаются нормированные сечения поглощения и рассеяния в рамках классической теории рассеяния Г. Ми:

$$b = \sqrt{\kappa^2 + 2\sigma\kappa} - \quad (1)$$

показатель ослабления светорассеивающей среды,

$$A = (b - \kappa) / (b + \kappa) - \quad (2)$$

альбедо, коэффициент отражения полубесконечного слоя.

Решение уравнения переноса в двухпотокном приближении позволило рассчитать световое поле и коэффициенты отражения $r(x)$, пропускания $\tau(x)$ и поглощения $a(x)$ плоского слоя оптически неоднородной водно-нефтяной эмульсии толщиной x , определяемые соотношениями

$$r(x) = [1 - \exp(-2bx)]A / [1 - A^2 \exp(-2bx)]; \quad (3)$$

$$\tau(x) = (1 - A^2) \exp(-bx) / [1 - A^2 \exp(-2bx)]; \quad (4)$$

$$a(x) = (1 - A)[1 - \exp(-bx)] / [1 + A \exp(-bx)]. \quad (5)$$

При этом соблюдается условие нормировки

$$r(x) + \tau(x) + a(x) = 1. \quad (6)$$

3. Математическая модель теплового режима воды в океане. Базовой математической моделью, используемой в качестве аппарата количественных расчетов и оценок, является замкнутая система следующих математических соотношений:

– одномерное дифференциальное уравнение теплопроводности, коэффициенты которого включают в себя ряд оптических и теплофизических параметров морской воды (природной среды) согласно упомянутым выше физическим моделям;

– зависимость поглощения солнечного излучения в воде от глубины (в рамках переноса солнечного излучения);

– сложное нелинейное граничное условие на поверхности воды, включающее в себя тепломассообмен (отражение в коротковолновом и переизлучение в длинноволновом диапазонах, а также конвективную составляющую) с различными значениями коэффициента пропускания солнечного излучения через пленку или взвесь загрязнения в воду;

– задание оптических характеристик нефтяной пленки (эмульсии) на поверхности воды.

Для учета основных параметров и характеристик лучистого теплопереноса в слое ВНЭ ограничимся конвективным и радиационным нагревом в отсутствие спектральной и температурной зависимости оптических характеристик и лучистого потока и их изменения во времени.

Итак, в общем виде лучистый теплоперенос с известной функцией $F(x, t, \kappa, \sigma, q_0)$ поглощенной энергии, а также энергетическими затратами на фазовые переходы на поверхности облучаемого водно-эмульсионного слоя представляется следующим уравнением теплопроводности:

$$c_p \cdot \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (K_T \frac{\partial T}{\partial x}) + F, \quad (7)$$

$$F(x) = \frac{q_0(1-A)b}{1-A^2 \exp(-2bH)} \{ \exp(-bx) - \exp[b(x-2H)] \}, \quad (8)$$

где q_0 – падающий на поверхность океана поток проникающей солнечной радиации.

К уравнению (7) необходимо присоединить условие теплообмена на поверхности воды – воздействие внешней конвекции и длинноволновых потоков терморрадиации:

$$\begin{aligned} x=0, \\ -K_T \cdot \partial T / \partial x = \alpha_T \cdot (T_A - T) + \varepsilon_{ef} \cdot c_0 (T_A^4 - T^4) + \\ + q_0^{UR} + q_0^{UV} - \rho L_v x'_v, \end{aligned} \quad (9)$$

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 ε_1 и ε_2 в длинноволновом диапазоне длин волн; q_0^{UR}, q_0^{UV} – части солнечного потока в ближней УФ- и ИК-областях спектра, для которых морская вода является непрозрачной средой; α_T – коэффициент теплоотдачи для граничной поверхности и атмосферы; c_0 – коэффициент Стефана-Больцмана; c_p, K_T – удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности; ρ – плотность морской воды; x'_v – скорость движения границы испарения; L_v – теплота испарения воды.

На тыльной границе плоского слоя чистой морской воды задан тепловой поток:

$$x = H - dT / dx = -0,04 / K_T. \quad (10)$$

Исходную температуру среды в начальный момент времени примем с градиентом, равным $-0,04$ ($^{\circ}\text{C}/\text{м}$), с поверхностной температурой 22°C .

Система уравнений и соотношений (7)–(10) представляет собой нелинейную краевую задачу Коши для дифференциального уравнения параболического типа.

4. Численные расчеты. 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 показаны 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 τ_{CW}); коэффициент отражения излучения от границы раздела двух сред определяется постоянной величиной до 8–10%, включающей вклад не более 2–5% по закону Френеля в зависимости от угла падения и дополнительную компоненту от вспененной поверхности океана. Это поверхностное отражение не зависит от толщины слоя вещества (кривая r_{CW}).



Рис. 1. Моделирование нефтяного загрязнения Атлантики через четыре месяца после разлива нефти в Мексиканском заливе [2]

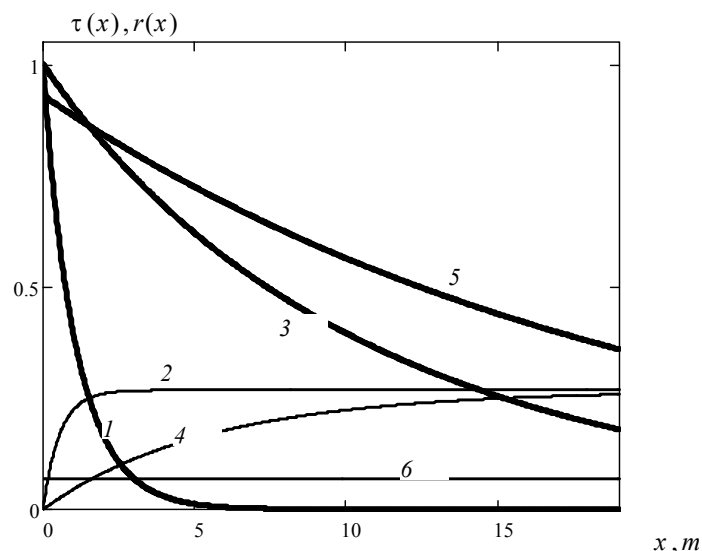


Рис. 2. Зависимость коэффициентов пропускания $\tau(x)$ и отражения $r(x)$ от толщины x подповерхностного слоя океана: кривые 1–4 (τ_{W2} , r_{W2} , τ_{W4} , r_{W4}) – сильно поглощающая и рассеивающая водно-нефтяная эмульсия κ_{W2} , σ_{W2} , κ_{W3} , $\sigma_{W3} \gg \kappa_{CW}$ (см. таблицу) кривые 5 и 6 (τ_{CW} , r_{CW}) – слабопоглощающая $\kappa_{CW} = 0,05 \text{ м}^{-1}$ морская вода с пренебрежимо малым рассеянием $\sigma_{CW} = 0$

Если в такой воде возникает рассеивающая примесь с показателем рассеяния, равным показателю поглощения κ_4 , $\sigma_4 \sim \kappa_{CW} = 0,05 \text{ м}^{-1}$, то отражение уже является

функцией толщины и возрастает до $\sim 27\%$ на глубине ~ 20 см (так называемая толщина полубесконечного слоя рассеивающей среды, материала) и с ростом тол-

щины больше не изменяется. Для других вариантов рассеивающих слоев ВНЭ за счет подбора показателей поглощения и рассеяния удается изменить поглощение в слое вещества, но отражение (альbedo) полубесконечного (толстого) слоя морской воды в данных расчетах принималось неизменным, характерным для загрязненного океана.

На рис. 3 представлены расчетные температурные распределения по глубине, формируемые в толще мор-

ской воды на третьи сутки в астрономические полдень $t = 2,25$ сут и полночь $t = 2,75$ сут при синфазных колебаниях температуры атмосферы от 17 до 27°C и потока солнечного излучения от 500 до 0 Вт/м². Проведены расчетные оценки температурных распределений за время t в толще x океана, загрязненного ВНЭ, – $TW1(x,t)$, $TW2(x,t)$ – кривые 1–3; чистой морской воды – $TCW(x,t)$ (кривая 4) и покрытой тонкой нефтяной пленкой – $TfW(x,t)$ (кривая 5).

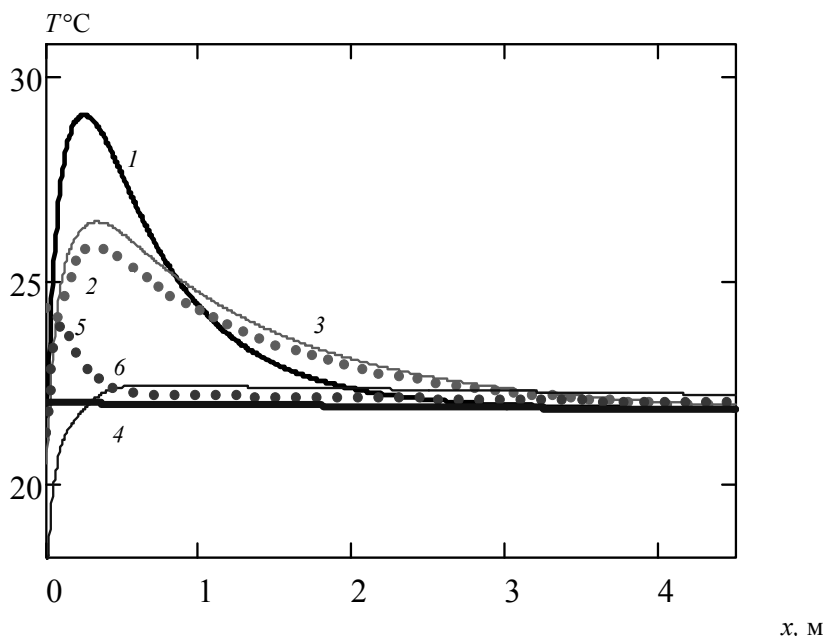


Рис. 3. Расчетные нестационарные распределения температуры морской воды с начальным распределением температуры $T_0(x)$ (кривая 6) на третьи сутки в астрономические полдень $2,25 \cdot \text{day}$ и полночь $2,75 \cdot \text{day}$ ($\text{day} = 24$ ч) при синфазном лучисто-конвективном воздействии внешней среды для 50-метровой толщи в различном масштабе (а) и (б): кривая 1 – $TW1(x, 2,75 \cdot \text{day})$ – сильно поглощающая $\kappa = 1 \text{ м}^{-1}$ ВНЭ оптической модели M1 (1/1-27) (см. таблицу); кривая 2 и 3 – $TW2(x, 2,25 \cdot \text{day})$, $TW2(x, 2,75 \cdot \text{day})$ – слабопоглощающая $\kappa = 0,5 \text{ м}^{-1}$ ВНЭ оптической модели M1 (0,5/0,5-27); кривая 4 – TCW – чистая морская вода оптической модели MCW; кривая 5 – TfW – нефтяная пленка оптической модели MfW; кривая 6 – начальное распределение температуры в морской воде

Оптические модели полупрозрачных водно-нефтяных эмульсий (с объемной концентрацией частиц нефтепродуктов $\sim 0,1\%$) с показателями рассеяния и поглощения $\sigma \sim \kappa = 0,05 - 2,0 \text{ м}^{-1}$ и нефтяной пленки (с коэффициентом пропускания $\tau_f = 60\%$) на поверхности океана; чистой морской воды с модельными затратами тепла на испарение q_v

Оптические модели рассеивающих $M(\kappa/\sigma - A\%)$ и нерассеивающих сред	Обозначение коэффициентов отражения r , пропускания τ на графиках рис. 2	$\kappa, \text{ м}^{-1}$	$\sigma, \text{ м}^{-1}$	Коэффициент объемного отражения (альbedo) полубесконечного слоя H_∞ $A = r(H \rightarrow \infty)$	Толщина полубесконечного плоского слоя с максимальным объемным коэффициентом отражения A ($\tau < 1\%$), $H_\infty, \text{ м}$	Толщина слоя с коэффициентом пропускания $\tau = 10\%$, $H_{\tau=0,1}, \text{ м}$
Поглощающая и рассеивающая водно-нефтяная эмульсия с частичной экранировкой испарения $(q_v)_{\text{ВНЭ}} = 12,5 \text{ Вт/м}^2$						
M1(1/1-27)	$rW1, \tau W1$	1	1	0,268	1,83	1,28
M12(1/2-38)	–		2	0,382	1,02	0,97
M2(0,5/0,5-27)	$rW2, \tau W2$	0,5	0,5	0,268	3,43	1,88
M21(0,5/1-38)	–		1	0,382	1,91	1,59
M3(0,25/0,25-27)	$rW3, \tau W3$	0,25	0,25	0,268	10,15	5,19
M4(0,05/0,05-27)	$rW4, \tau W4$	0,05	0,05	0,268	49,52	26,15
Поглощающая и нерассеивающая сплошная нефтяная пленка, препятствующая испарению, $(q_v)_{\text{ПНЭ}} = 0$						
MfW	–	$\gg 0,05$	0	– * 0,268	–	–
Слабопоглощающая и нерассеивающая морская вода с естественными затратами тепла на испарение $(q_v)_{\text{CW}} = 25 \text{ Вт/м}^2$						
MCW	$rCW, \tau CW$	0,05	0	– * 0,070	–	44,53

На графиках показаны температурные распределения для двух оптических моделей загрязнения: 1) силь-

но поглощающей ВНЭ с показателем поглощения $\kappa = 1 \text{ м}^{-1}$ оптической модели M1(1/1-27) – температур-

ный профиль $TW1(x, 2,75 \cdot tday)$ (кривая 1, $tday = 24$ ч); 2) слабопоглощающей ВНЭ ($\kappa = 0,5 \text{ м}^{-1}$) оптической модели M2 (0,5/0,5–27) – температурные профили $TW2(x, 2,25 \cdot tday)$ и $TW2(x, 2,75 \cdot tday)$ (кривые 2 и 3).

Для оптической модели M2(0,5/0,5–27) наибольшая температура $\sim 24^\circ\text{C}$ поверхности океана (при $x = 0$) достигается в полдень $t = 2,25$ сут и представлена температурным распределением $TW2(x, 2,25 \cdot tday)$ (кривая 2) с присутствием так называемого холодного скин-слоя (толщиной до 30 см) относительно подповерхностного максимума температуры в $\sim 26^\circ\text{C}$. Для той же модели ТПО снижается до $\sim 21^\circ\text{C}$ на температурном профиле $TW2(x, 2,75 \cdot tday)$ (кривая 3) к полнотемпературы. Толщина скин-слоя практически не меняется, но сам скин-слой более холодный на несколько градусов, а подповерхностный температурный максимум даже возрастает примерно на 1° до $\sim 27^\circ\text{C}$ за счет стока к поверхности океана кондуктивного тепла, вызванного ночным выхолаживанием длинноволновой терморрадиацией и конвекцией. Эти расчеты подтверждаются экспериментальными данными.

Рост показателей поглощения и рассеяния для ВНЭ модели M1(1/1–27) приводит к более существенному росту температуры $TW1(x)$ (кривая 1) и перегреву в подповерхностной области в сравнении ТПО модели M2 (0,5/0,5–27) ($TW1(x)$ – кривая 1). Но проникающий лучистый поток в толщу морской воды уменьшается, что приводит к снижению температуры нагрева уже на глубине ~ 1 м в сравнении с ВНЭ модели M2 с меньшим ослаблением $\kappa_2, \sigma_2 < \kappa_1, \sigma_1$, чем в модели M1. Таким образом, для более чистого океана нагрев на поверхности будет меньшим, а прогрев в глубине – большим.

Предлагаемый подход позволяет по-новому рассмотреть физический механизм нагрева океана, и это имеет принципиальное значение. Расчеты показывают, что увеличение процессов рассеяния будет вызывать смещение температурного профиля к поверхности океана (за счет обратного рассеяния проникающего солнечного излучения глубинными слоями) при слабом изменении самих температур, а рост поглощения, очевидно, будет способствовать увеличению значений этой температуры.

Суточные колебания температуры атмосферы и солнечного потока обуславливают осцилляции тем-

пературы на поверхности океана, которые меняют не только значение градиента температуры, но и его знак. К ночи имеет место сток кондуктивного тепла к поверхности из перегретой поверхностной области, а к полудню в процессе наблюдается естественная инверсия температурных профилей, например $TW2(x, t)$ (кривые 2 и 3) в подповерхностной области ТПО (SST).

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. В случае сплошной полупрозрачной нефтяной пленки (кривая TfW) имеет место рост поглощенного (до 30%) и отраженного (до 60%) потоков солнечного излучения; при этом поток солнечного тепла, воздействующий на глубинные слои морской воды, уменьшается до $\sim 200 \text{ Вт/м}^2$ (что существенно меньше поглощенного потока тепла для чистой океанической воды $\sim 470 \text{ Вт/м}^2$). Наличие ВНЭ или пленки характеризует интенсивный прогрев океана вблизи своей поверхности. При загрязнении океана ВНЭ температура морской воды может достигать 30°C после трехсуточного прогрева в штиль, причем пропорционально росту не только поглощения, но и рассеяния.

Для водно-нефтяной эмульсии и пленки, частично экранирующей проникающий поток солнечной энергии, на глубинах $x > 3\text{--}5$ м температура океана (рис. 3, кривые 1–3, 5), меньше, чем в случае прогрева чистой воды $T_{ВНЭ}(x) < TW(x)$ (рис. 3, кривая 4). Таким образом, имеет место снижение прогрева глубинных слоев океана на фоне перегрева подповерхностной области и роста ТПО (SST). При длительном нагреве океана солнечным излучением температура воздушной среды также возрастает за счет увеличенного альбедо загрязненной воды, кондуктивного и прежде всего конвективного стоков теплоты в атмосферу. Как следует из полученных результатов, зона аномального прогрева загрязненной морской воды (и зарождения антициклонов) не только активно расширялась, но и продвигалась на восток вместе с Гольфстримом (см. рис. 1).

ЛИТЕРАТУРА

1. Малинин В.Н. Разлив нефти в Мексиканском заливе. РГГМУ. СПб., 2010. URL: <http://online812.ru/2010/09/28/012/pdf/>
2. NOAA (National Oceanic & Atmospheric Administration) / ESRL (Earth System Research Laboratory). Physical Science Division. URL: <http://blog.agu.org/geospace/2010/08/25/blocked-up-weather/>
3. Красс М.С. Математические модели и численное моделирование в гляциологии. М.: МГУ, 1981. 40 с.
4. Красс М.С., Геворкян С.Г., Мерзлякин В.Г., Товстоногов В.А. Методика расчета радиационных и температурных полей снежных и ледяных массивов // Материалы гляциологических исследований. 2000. Вып. 90. С. 142–147.
5. Howe J.T., Green M.J., Weston K.C. Thermal shielding by subliming volume reflectors in convective and intense radiative environments // AIAA Journal. 1973. Vol. 11, № 7. NASA Ames research center. Moffet Field, Calif. U.S.A.
6. 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., № 07M-171, 2007.
7. Доронин Ю.П. Физика океана. СПб., 2000. 287 с.
8. Федоров К.Н., Гинзбург А.И. Приповерхностный слой океана. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 304 с.
9. Grassl H. The dependence of the measured cool skin of ocean on wind stress and total heat flux // Boundary-Layer meteorology. 1976. Vol. 10, № 4. P. 465–474.
10. Wells A.J., Cenedes C.E., 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.
11. 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. URL: http://www.ifm-geomar.de/fileadmin/personal/fb1/me/nkeenlyside/Reports/DFG_finalreport.pdf/

12. Чавро А.И. Физические основы и методы определения температуры поверхности океана. М.: Изд-во АН СССР, 1990. 173 с.
13. 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, is. 8. 15 January. P. 1059–1068.
14. Товстоног В.А. Анализ теплообмена в светорассеивающих материалах, нагреваемых излучением // *Физика и химия обработки материалов*. 1985. № 3. С. 35–40.
15. Шифрин К.С., Ионина С.Н. Тепловое излучение и отражение волнующейся поверхности моря в микроволновой области // *Труды ГГО*. 1968. Вып. 222. С. 22–48.
16. Артемьев А.Н. Взаимодействие атмосферы и подстилающей поверхности на антарктическом плато // *Тр. САС*. 1976. Т. 66. 71 с.
17. Красс М.С., Мерзликин В.Г. Радиационная теплофизика снега и льда. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 262 с.
18. Koh G., Jordan R. Sub-surface melting in seasonal snow cover // *J. of Glaciology*. 1995. Vol. 41, № 139. P. 474–482.
19. Монин А.С. Климат как проблема физики // *Успехи физических наук*. 2000. Т. 70, № 4. С. 419–445.
20. Красс М.С. Моделирование эколого-экономических систем. М.: ИНФРА-М, 2010. 272 с.
21. 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.
22. Красс М.С., Мерзликин В.Г. Техногенные аномалии климата и стратегическое планирование // *Экономические стратегии*. 2011. № 4.

Статья представлена научной редакцией «Науки о Земле» 30 июля 2011 г.