

К.А. Клеванный

ОПЫТ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НЕФТЕПРОДУКТОВ ВО ВЗВОЛНОВАННОМ МОРЕ

К.А. Klevannyu

CASE STUDY OF OIL SPILL PROPAGATION IN WAVING SEA

Обсуждается применение адвективно-диффузионного уравнения в эйлеровской постановке для моделирования распространения аварийных разливов нефтепродуктов во взволнованном море. Для расчета течений используются уравнения гидродинамики в приближении гидростатики в трехмерной постановке. Приводится пример расчета распространения дизельного топлива в юго-восточной части Баренцева моря.

Ключевые слова: нефтяной разлив, Баренцево море, программный комплекс CARDINAL.

Application of the advection — diffusion equation in the Eulerian variables for the simulation of fate of oil spills in the storm sea is discussed. Currents are calculated with 3D equations of motion in the hydrostatic assumption. An example of modeling of diesel fuel spill in the South-East part of the Barents Sea is done.

Key words: oil spill modeling, Barents Sea, CARDINAL modeling system.

При оценке воздействия аварийных разливов нефтепродуктов на окружающую среду требуются расчеты: продолжительности существования пятен загрязнения с нефтяной пленкой на поверхности моря, общей продолжительности существования нефтяного загрязнения до снижения концентраций ниже заданного значения, траектории дрейфа пятна, общей площади поверхности акватории моря, по которой продрейфовало пятно загрязнения, глубины проникновения углеводородов в толщу вод, возможности осаждения их на дно и донные организмы, вероятности достижения пятном нефтепродуктов берега. Нефтяные разливы относятся к числу наиболее сложных и динамичных явлений распространения примесей. В воде нефтепродукты растекаются за счет положительной плавучести, испытывают диффузионное рассеяние, испарение, растворение, окисление, микробное разложение, агрегирование, они перемещаются под действием ветра и течений, происходит их проникновение в толщу воды (дисперсия) и образование эмульсии [14]. Нефть может сорбироваться взвесью и оседать с ней в донные осадки.

В штилевых условиях пятно нефти сначала проходит три фазы своего распространения [20]: инерционную, гравитационно-вязкую и фазу поверхностного натяжения. Растекание под действием плавучести, поверхностного натяжения и вязких сил при разливах менее 1000 т действует непродолжительное время на расстоянии несколько сотен метров. При распространении легких сортов нефтепродуктов, таких как дизельное топливо (ДТ), большую роль играет испарение, интенсивность которого зависит от

скорости ветра и температуры воды [22]. В морских условиях при наличии волнения, особенно штормового, когда происходит большинство аварийных разливов, нефть диспергируется в толщу воды, и для описания ее распространения можно использовать адвективно-диффузионное уравнение. Пленка нефти разбивается волнением на отдельные небольшие пятна, а затем на мелкие капли диаметром от 1–5 до 500 мкм, которые увлекаются вглубь и могут долго находиться во взвешенном состоянии. Если вертикальная скорость воды в волнах превосходит скорость всплывания нефтяной капли, то будет происходить проникновение нефтепродуктов в толщу воды. Капли диаметром менее 70 мкм остаются в диспергированном состоянии почти в любых морских условиях. Глубина проникновения нефтепродуктов в толщу воды пропорциональна энергии обрушения волн и составляет по оценкам $3/2$ от значимой высоты волн. В воде с высоким содержанием взвешенных веществ проникновение нефти в толщу воды происходит более интенсивно.

Дрейф нефтяного пятна определяется в основном направлением и скоростью ветра. Приблизительно можно считать, что скорость дрейфа пятна нефти относительно воды \vec{u}_w составляет 3,5 % от скорости ветра, измеренной на высоте 10 м, а направление ветрового дрейфа отклоняется от направления ветра на 20° по часовой стрелке в Северном полушарии. Этот дополнительный дрейф на $2/3$ обусловлен незамкнутостью орбит частиц в ветровых волнах (дрейф Стокса). Оставшаяся $1/3$ представляет движение нефтяного слика по поверхности воды [22].

Предельно допустимая концентрация нефтепродуктов для объектов рыбохозяйственного назначения равна 50 мкг/л. При концентрациях 1000 мкг/л начинаются летальные эффекты [14]. Концентрации углеводородов в Баренцевом море согласно измерениям лежат в пределах 1–100 мкг/л [11].

Модели распространения нефтепродуктов в море интенсивно разрабатываются во всем мире. Наибольшее распространение получил траекторный метод, в котором из источника разлива дискретно выпускаются так называемые «спиллеты», траектория которых рассчитывается по гидродинамической модели с учетом их дополнительного перемещения ветром, волнами и турбулентностью (PADM, OSIS, OILMAP, OSCAR, PISCES). Каждому спиллету присваивается начальная масса, диаметр и другие свойства. Взаимодействие спиллетов может учитываться «расталкиванием» спиллетов при их пересечении [23]. В модели OILMARS [18] используется лагранжево-эйлеровский подход, в котором перенос спиллетов определяется как и в приведенных выше моделях, но затем для каждого спиллета строится детальная расчетная сетка, и в переменных Эйлера рассчитывается его трансформация. В модели SPILLMOD [12] для расчета распространения нефти по поверхности воды используется специальное уравнение динамики двухфазной сплошной среды.

В данной работе расчеты распространения нефтепродуктов выполнялись с помощью программного комплекса CARDINAL [9, 15] в предположении, что, благодаря обрушению волн, нефть достаточно быстро переходит в диспергированное состояние. Решались в трехмерной постановке с помощью конечно-разностных методов на вложенных сетках уравнения гидродинамики в гидростатическом приближении для баротропной жидкости со свободной поверхностью и адвективно-диффузионное уравнение для концентрации нефти:

$$\vec{u}_t + (\vec{u}\nabla)\vec{u} + w\vec{u}_z = -g\nabla\zeta + \vec{f} \times \vec{u} + K\Delta\vec{u} + (\nu_T\vec{u}_z)_z, \quad (1)$$

$$w_z + \text{div } \vec{u} = \omega_s, \quad (2)$$

$$\zeta_t + \text{div } \vec{U} = \varpi_s, \quad (3)$$

$$c_t + \text{div}[(\vec{u} + \vec{u}_w)c] + [(w + w_0)c]_z = K_c\Delta c + (\nu_c c_z)_z + \omega_s c_s - \lambda c, \quad (4)$$

где $\vec{u}_w = (u, v)$ — вектор горизонтальной компоненты скорости течения; w — его вертикальная компонента; g — ускорение свободного падения; ζ — уровень свободной поверхности; \vec{f} — параметр Кориолиса; K и ν_T — коэффициенты горизонтального и вертикального турбулентного обмена; ω_s, ϖ_s — приток массы (воды, нефти) из источников разлива на единицу объема и на единицу площади поверхности, соответственно; \vec{U} — удельный расход воды; c — концентрация нефтепродуктов; w_0 — конвективная скорость всплывания капель нефтепродуктов; K_c и ν_c — коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентной диффузии; c_s — концентрация нефтепродуктов в источнике; λ — коэффициент неконсервативности нефтепродуктов, связанный с испарением или биодеградацией. Координата z направлена вертикально вверх.

На дне при $z = -h(x, y)$ задается касательное напряжение трения с помощью квадратичного закона

$$\vec{\tau}_b = \rho_w \nu_T \vec{u}_z \Big|_{z=-h} = -\rho_w f_b \vec{u} \Big|_{z=-h}, \quad (5)$$

где ρ_w — плотность воды; f_b — коэффициент придонного трения, который принимался равным 0,0026.

На поверхности касательное напряжение трения также задается с помощью квадратичного закона

$$\vec{\tau}_s = \rho_w \nu_T \vec{u}_z \Big|_{z=\zeta} = \rho_a C_D \vec{W} |\vec{W}|, \quad (6)$$

где ρ_a — плотность воздуха (1,225 кг/м³); \vec{W} — скорость ветра на высоте 10 м; C_D — коэффициент ветрового трения, который задавался по формуле Банке и Смита

$$C_D = (0,63 + 0,066 |\vec{W}|) \cdot 10^{-3}. \quad (7)$$

На участках твердой границы горизонтальная скорость считалась равной нулю, на участках открытой границы во внешних моделях задавались временные колебания уровня, обусловленные приливами, а в локальных вложенных моделях — временные колебания вертикального распределения нормальной к границе компоненты скорости, полученные из внешних моделей.

Для определения коэффициентов вертикального турбулентного обмена ν_T и вертикальной турбулентной диффузии ν_c использовалась k - ε модель турбулентности [17], в которой они определяются из соотношений

$$v_T = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad v_c = \text{Pr} \cdot v_T, \quad (8)$$

где k — кинетическая энергия турбулентных пульсаций; ε — скорость диссипации этой энергии за счет внутреннего трения; $c_\mu = 0,09$, $\text{Pr} = 0,96$.

Уравнения для k и ε решались без учета адвективных членов, имеющих второй порядок малости:

$$\begin{aligned} k_t &= (v_T k_z)_z + v_T P - \varepsilon, \\ \varepsilon_t &= \left(\frac{v_T}{1,314} \varepsilon_z \right)_z + 1,44 \frac{\varepsilon}{k} v_T P - 1,92 \frac{\varepsilon^2}{k}, \end{aligned} \quad (9)$$

где $P = u_z^2 + v_z^2$.

Для энергии турбулентности и ее диссипации задаются следующие граничные условия на дне (b) и на поверхности (s):

$$\begin{aligned} k_b &= \frac{u_*^2}{\sqrt{c_\mu}} = \frac{f_b u_b^2}{\sqrt{c_\mu}}, & k_s &= C_D \frac{\rho_a W^2}{\rho_w}, \\ \varepsilon_b &= \frac{u_*^3}{\kappa z_b} = \frac{c_\mu^{3/4} k_b^{3/2}}{\kappa z_b}, & \varepsilon_s &= \frac{u_*^3}{\kappa z_s} = \frac{c_\mu^{3/4} k_s^{3/2}}{\kappa z_s}, \end{aligned} \quad (10)$$

где u_* — скорость трения; $\kappa = 0,4$ — постоянная Кармана; z_b и z_s — параметры шероховатости дна и поверхности, соответственно.

Коэффициенты горизонтального турбулентного обмена и горизонтальной турбулентной диффузии задавались по закону «4/3» [13]

$$K = K_s = \gamma (\sqrt{\Delta s})^{4/3}, \quad (11)$$

где Δs — площадь расчетной ячейки. Параметр γ , характеризующий скорость диссипации турбулентной энергии, задавался равным $0,05 \text{ м}^{2/3} \text{ с}^{-1}$.

На поверхности воды задается граничное условие отсутствия турбулентного и конвективного потоков нефти

$$v_c c_z|_{z=\zeta} = 0, \quad w_0|_{z=\zeta} = 0. \quad (12)$$

Скорость всплывания капель нефтепродуктов диаметром d определялась по модифицированной формуле Стокса

$$w_0 = \frac{gd^2 \Delta}{18\nu_M + 0,61\sqrt{g\Delta d^3}}, \quad (13)$$

где $\Delta = (\rho_{oil} - \rho_w)/\rho_w$ — относительная разность плотностей нефти и воды. Молекулярная вязкость воды ν_M определяется по заданной температуре воды t °C

$$\nu_M = \frac{1,775 \cdot 10^{-6}}{1 + 0,0337t + 0,000222t^2}. \quad (14)$$

Расчеты выполнялись с использованием неявных конечно-разностных схем повышенной точности [6, 9, 21]. Одной из наиболее сложных задач при разработке численной схемы расчета распространения примеси является аппроксимация адвективных членов. Разработанному алгоритму предшествовала большая серия испытаний других схем. В результате был разработан гибридный алгоритм расчета адвекции с помощью направленных разностей третьего и первого порядка точности, в котором схемная диффузия мала, а дисперсия (появление осцилляций) гасится направленными разностями первого порядка [21]. Обе аппроксимации участвуют с весом, определяемым в процессе счета степенью гладкости решения. Схема третьего порядка точности для положительных скоростей имеет вид

$$(uc)_x = \frac{1}{\Delta x} \left[u_{i+1/2} \left(\frac{1}{3}c_{i+1} + \frac{5}{6}c_i - \frac{1}{6}c_{i-1} \right) - u_{i-1/2} \left(\frac{1}{3}c_i + \frac{5}{6}c_{i-1} - \frac{1}{6}c_{i-2} \right) \right]. \quad (15)$$

Расчеты выполнялись с использованием гранично-зависимых переменных $\xi = \xi(x, y)$, $\eta = \eta(x, y)$ на криволинейной сетке, построенной эллиптическим методом Томпсона [24], в котором декартовы координаты узлов сетки $x(\xi, \eta)$ и $y(\xi, \eta)$ находятся из решения уравнений

$$\begin{aligned} g_{22} x_{\xi\xi} - 2g_{12} x_{\xi\eta} + g_{11} x_{\eta\eta} &= 0, \\ g_{22} y_{\xi\xi} - 2g_{12} y_{\xi\eta} + g_{11} y_{\eta\eta} &= 0, \end{aligned} \quad (16)$$

где $g_{11} = x_{\xi}^2 + y_{\xi}^2$, $g_{22} = x_{\eta}^2 + y_{\eta}^2$, $g_{12} = x_{\eta}x_{\xi} + y_{\eta}y_{\xi}$, $x(\xi, \eta)$ и $y(\xi, \eta)$ заданы вдоль отрезков граничных координатных линий $\xi = \text{const}$ и $\eta = \text{const}$.

Для вертикальной координаты используется σ -преобразование, обеспечивающее сгущение узлов сетки на мелководье

$$\sigma(x, y, z, t) = \frac{z+h}{h+\zeta}. \quad (17)$$

Кроме того, при построении расчетной сетки было сделано сгущение слоев к поверхности. На глубине 20 м при задании по вертикали 18 расчетных слоев ближайший к поверхности слой находится на глубине 2,4 см.

Для параметризации процесса испарения использовалась модель ADIOS2 (Automated Data Inquiry for Oil Spills) [2, 22], которая позволяет определить временной ход доли испарившейся и диспергированной нефти, ход увеличения ее плотности. При ее разработке использовались данные натуральных экспериментов, в основном

лабораторных, и результаты теоретических исследований. В ADIOS2 можно задать только постоянные значения ветра и скорости течения, траектория дрейфа пятна в ней не моделируется.

Рассмотрим в качестве примера результаты моделирования аварийного разлива 200 т дизельного топлива в юго-восточной части Баренцева моря в районе Печорской губы, на расстоянии 20 км от полуострова Русский Заворот. Расчеты выполнялись при задании постоянного западного ветра силой 10 м/с. Сначала по модели Баренцева моря [1] был сделан расчет течений, обусловленных ветром и приливами. Приливо-отливные колебания уровня на открытых границах моря задавались по базе данных WXTide32 [5]. Для арктических морей возможен также расчет приливов по программе AODTM-5 [16] (Arctic Ocean Dynamics-based Tide Model) с шагом 5 км. Из базы ADIOS2 был выбран тип Diesel fuel oil, Southern USA, 1997, так как соответствующие параметры свойств ДТ из нефтегазовых провинций Баренцева моря не были обнаружены. Для расчета распространения ДТ была сделана локальная модель участка разлива со средним шагом сетки 750 м. Координаты береговой линии и глубины брались из баз данных NOAA [3, 4]. Во время расчета по модели Баренцева моря записывался временной ход вертикального распределения нормальной к границе компоненты скорости на участках открытой границы локальной модели. Полученные данные импортировались в локальную модель. Разлив задавался через источниковый член в (4), действовавший в приповерхностном слое в течение 5 мин. Мощность источника $\omega_s V_s c_s = q_s c_s$, где V_s — объем расчетной ячейки, в которой задан разлив, q_s — приток массы в этой ячейке за единицу времени) задавалась равной 666,7 кг/с. При разливе 200 т ДТ с плотностью 836 кг/м³ и коэффициентом поверхностного натяжения 0,3 н/м в спокойное море согласно соотношениям Фэя [19, 20] первая инерционная фаза растекания будет длиться 8 мин, диаметр пятна станет равным 100 м при толщине 2,3 см и скорости растекания 17 см/с. Через 23 мин, к концу второй, вязко-гравитационной фазы, диаметр пятна станет равным 175 м при толщине 0,8 см, скорость растекания уменьшится до 4 см/с. Третья фаза, при которой вязкие силы уравниваются силой поверхностного натяжения, длится 48 ч, диаметр пятна достигнет 10,2 км, при толщине 2 мкм и скорости растекания 2 см/с. При скорости ветра 10 м/с и скорости течения 30–85 м/с скорость дрейфа пятна доходит до 1,2 м/с, так что скорость растекания 200 т ДТ, полученная по соотношениям Фэя, может быть сопоставима с ней только в первые несколько минут после разлива. Эти оценочные значения следует учитывать при задании размера расчетной ячейки, в которой помещен источник и в которой примесь считается равномерно перемешанной. В расчете источник был задан в третьем от поверхности слое на глубине 7 см в ячейке с шагом сетки 1100 м. Другая возможность задания разлива — это задание начального пятна с учетом соотношений Фэя; такой подход использован в [7, 8] при моделировании растекания нефти в районе месторождения Кашаган в Каспийском море.

Расчет по программе ADIOS2 показал, что при ветре 10 м/с, температуре воды 8 °С, высоте волн 1,2 м (определена по программе SWAN [10]), солёности 15 ‰ и концентрации взвешенных веществ 50 мг/л через 18 ч испарится примерно 21 % топлива (42 т), а остальные 79 % (158 т) будут распространяться в диспергированном виде (в виде капель), нефтяная пленка исчезнет. Плотность ДТ за счет испарения легких

фракций увеличится с 836 до 904 кг/м³. Эмульсии при разливе ДТ не образуются. Для получения значения коэффициента неконсервативности λ в (4), при котором потеря массы при испарении будет соответствовать данным [2], имеем

$$c(t) = c_0 e^{-\lambda t} \quad \text{и} \quad \lambda = -\frac{\ln(c/c_0)}{t} = -\frac{\ln(0,79)}{3600 \cdot 18} = 3,6 \cdot 10^{-6} \text{ c}^{-1}. \quad (18)$$

Это значение коэффициента неконсервативности было задано в течение первых 18 ч распространения ДТ. После чего этот коэффициент задавался равным нулю.

Размер капель следовало бы задавать исходя из заданного закона их распределения, но соответствующие экспериментальные данные (кроме лабораторных), согласно [23], отсутствуют. Был задан диаметр капель равным 250 мкм, скорость их всплытия w_0 , рассчитанная по (13), (14) равна 2,3 мм/с.

На рис. 1 показана динамика изменения (с интервалом 12 ч) положения пятна ДТ, ограниченного концентрацией 50 мкг/л, в поверхностном слое. Пятно дрейфует на восток, достигнув через 96 ч побережья п-ва Русский Заворот и, далее, о-вов Гуляевские Кошки. Форма пятна близка к круговой, что обусловлено разнонаправленностью скоростей течений в приливном море во времени и по вертикали. Через 6 ч диаметр пятна составил 16 км. Тестовый расчет без ветра и течений показал, что расширение обусловлено в основном дрейфом пятна, а не диффузией. Пятно с концентрациями выше 50 мкг/л просуществовало 198 ч, переместившись за это время на 142 км и имея максимальный диаметр 36 км через 108 ч после разлива. Максимальный объем облака загрязненной воды с $c > 50$ мкг/л достигал 1,25 км³, а его площадь — 712 км². За время движения это облако проплыло через водное пространство объемом 3,69 км³ по акватории площадью 3912 км². Протяженность загрязненной береговой линии составила 110 км. Пример распределения концентраций в поверхностном слое показан на рис. 2. При взаимодействии пятна с берегом получено увеличение концентраций. На рис. 3 представлены изолинии концентраций на вертикальном разрезе, проходящем через центр пятна через 1 сутки после разлива. Значимые значения концентраций дна в данном случае не достигают. На рис. 4 показан временной ход площадей пятен с концентрациями выше 25 и 50 мкг/л. Площади пятен сначала в целом увеличиваются, затем сокращаются. По мере распространения толщина загрязненного слоя уменьшается, и на величине площади пятен начинают все сильнее сказываться приливо-отливные колебания, имеющие период около 12 ч, и создающие периодически зоны дивергенции и конвергенции течений. Это приводит к соответственным синхронным колебаниям значений площади пятен.

Результаты свидетельствуют о возможности применения адвективно-диффузионного уравнения для моделирования распространения аварийных разливов нефтепродуктов в морских (не штилевых) условиях для оценки ущерба окружающей среде. В данной работе расчеты течений выполнялись в баротропной постановке. При создании оперативной модели прогноза распространения нефти в Баренцевом море следует учесть плотностные течения и включить в модель расчет полей температуры и солености. Для прогноза ветра возможно подключение региональной метеорологической модели. В ПК CARDINAL имеется блок автоматизированного приема

метеорологической информации о ветре и давлении в формате GRIB из метеорологических моделейHIRLAM, COSMO, WRF. Развитием представленного метода расчета может стать учет наличия спектра диаметров капель нефтепродуктов, имеющих различные скорости всплывания и более обоснованное определение коэффициента горизонтальной диффузии. Моделирование нефтяных разливов в море затруднено отсутствием практической возможности валидации результатов расчетов.

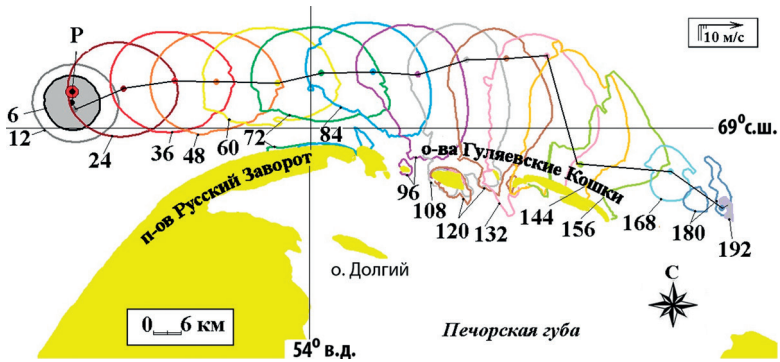


Рис. 1. Изменение положения пятна с концентрациями выше 50 мкг/л в поверхностном слое. Цифры показывают время в часах после разлива. Р — местоположение разлива

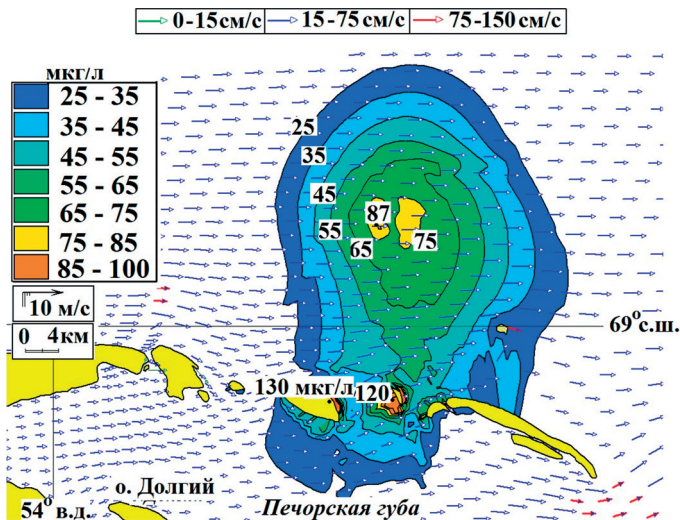


Рис. 2. Изолинии концентраций (мкг/л) дизельного топлива в поверхностном слое через 120 ч после разлива

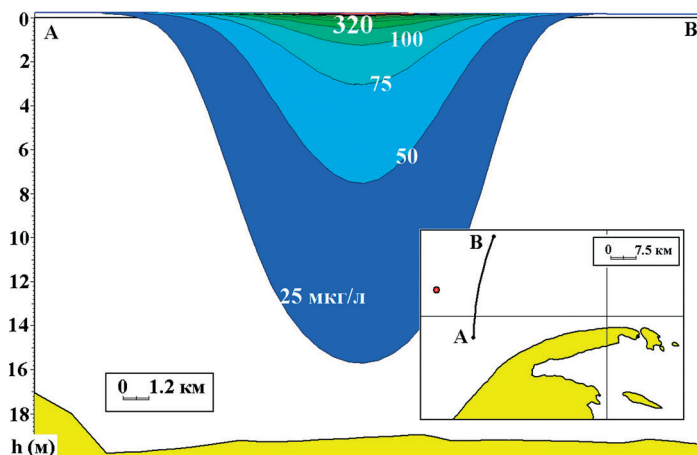


Рис. 3. Распределение концентраций дизельного топлива на вертикальном разрезе А–В (его положение показано на врезке), проходящем через центр пятна, через 24 ч после разлива

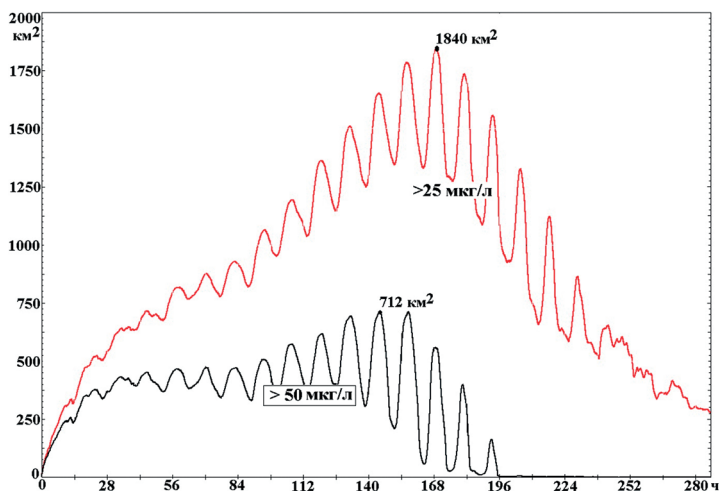


Рис. 4. Временной ход площади облаков загрязненной воды с концентрациями выше 25 и 50 мкг/л

Литература

1. *Аверкиев А.С., Клеванный К.А.* Моделирование течений в Баренцевом море в связи с освоением Штокмановского газоконденсатного месторождения // *Метеорология и гидрология*, 2010, № 11, с. 44–56.
2. База данных для расчетов разливов нефти ADIOS2. — URL: [http://archive.orr.noaa.gov/type_topic_entry.php?RECORD_KEY\(entry_topic_type\)=entry_id,topic_id,type_id&entry_id\(entry_topic_type\)=181&topic_id\(entry_topic_type\)=1&type_id\(entry_topic_type\)=3](http://archive.orr.noaa.gov/type_topic_entry.php?RECORD_KEY(entry_topic_type)=entry_id,topic_id,type_id&entry_id(entry_topic_type)=181&topic_id(entry_topic_type)=1&type_id(entry_topic_type)=3)

3. База данных об береговой линии Земного шара. — URL: [http://archive.orr.noaa.gov/topic_subtopic_entry.php?RECORD_KEY%28entry_subtopic_topic%29=entry_id,subtopic_id,topic_id&entry_id\(entry_subtopic_topic\)=182&subtopic_id\(entry_subtopic_topic\)=8&topic_id\(entry_subtopic_topic\)=1](http://archive.orr.noaa.gov/topic_subtopic_entry.php?RECORD_KEY%28entry_subtopic_topic%29=entry_id,subtopic_id,topic_id&entry_id(entry_subtopic_topic)=182&subtopic_id(entry_subtopic_topic)=8&topic_id(entry_subtopic_topic)=1)
4. База данных об отметках поверхности Земли. — URL: <http://maps.ngdc.noaa.gov/viewers/wcs-client>
5. База данных по приливам Мирового океана. — URL: <http://www.wx tide32.com>
6. *Вольцингер Н.Е., Клеванный К.А., Пелиновский Е.Н.* Длинноволновая динамика прибрежной зоны. — Л.: Гидрометеоздат, 1989. — 270 с.
7. *Клеванный К.А., Оразбаева К.Н., Утенова Б.Е., Курмангазиева Л.Т., Оразбаев Б.Б.* Применение методов математического моделирования при решении экологических задач казахстанского сектора Каспийского моря // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе, 2014, № 4, с. 14–19.
8. *Клеванный К.А., Оразбаев Б.Б., Оразбаева К.Н., Кенжегалеев А., Курмангазиева Л.Т., Утенова Б.Е.* Разработка моделей Северного Каспия для расчета распространения нефти с применением программного комплекса CARDINAL // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе, 2014, № 4, с. 20–29.
9. *Клеванный К.А., Смирнова Е.В.* Использование программного комплекса CARDINAL // Журнал Университета водных коммуникаций, 2009, вып. 1, с. 153–162.
10. Модель ветрового волнения SWAN. — URL: <http://fluidmechanics.tudelft.swan/download/downloads.htm>
11. *Немировская И.А.* Углеводороды в океане: снег–лед–вода–взвесь–донные осадки. — М., 2004.
12. *Овсиенко С.Н., Зацепя С.Н., Ивченко А.А.* Моделирование разливов нефти и оценка риска воздействия на окружающую среду // Труды ГОИН, 2005, вып. 209, с. 248–271.
13. *Окубо А., Озмидов Р.В.* Эмпирическая зависимость коэффициента горизонтальной диффузии в океане от масштаба явления // Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 1970, т. 6, № 5, с. 534–536.
14. *Панин С.А.* Нефть и экология континентального шельфа. — М.: ВНИРО, 2001. — 245 с.
15. Программа для гидродинамического и гидроэкологического моделирования CARDINAL. — URL: <http://cardinal-hydrosoft.com>
16. Программа для расчета приливов в арктических морях. — URL: https://www.esr.org/polar_tide_models/Model_AODTM5.html
17. *Роди В.* Модели турбулентности окружающей среды. Методы расчета турбулентных течений. — М.: Мир, 1984, с. 227–322.
18. *Становой В.В., Еремина Т.Р., Карлин Л.Н., Исаев А.В., Неелов И.А., Ванкевич Р.Е.* Оперативно-прогностическое моделирование распространения нефтяного загрязнения в Финском заливе // Учёные записки РГГМУ, 2011, № 18, с. 151–169.
19. *Fallah V.H., Stark R.M.* Random drift of an idealized oil patch // Ocean Engineering, 1976, vol. 3, iss. 2, pp. 83–97.
20. *Fay J.A.* The spread of oil slicks on a calm sea. // Oil on the Sea. Ed. D.P. Hout. —N.Y., Plenum Press, 1969, pp. 53–63.
21. *Klevanny K.A., Matveyev G.V., Voltzinger N.E.* An integrated modelling system for coastal area dynamics // International Journal for Numerical Methods in Fluids, 1994, vol. 19, iss. 3, pp. 181–206.
22. *Lehr W., Jones R., Evans M., Simecek-Beatty D., Overstreet R.* Revisions of the ADIOS oil spill model. // Environmental Modelling & Software, 2002, vol. 17, pp. 191–199.
23. *Liungman O., Mattsson J.* Scientific Documentation of Seatrack Web; physical processes, algorithms and references, 2011. — URL: http://www.smhi.se/polopoly_fs/1.15600!Seatrack%20Web%20Scientific%20Documentation.pdf
24. *Thompson J.F., Warsi Z.U.A., Mastin C.W.* Numerical Grid Generation. Foundation and Application. — North-Holland Publ., 1985.