

## РАСЧЕТ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АВАРИЙНОГО РАЗЛИВА СУДОВОГО ТОПЛИВА В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ КАРСКОГО МОРЯ

И.П. Трубкин<sup>1</sup>, И.А. Немировская<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Всероссийский научно-исследовательский институт экологии  
(ФГБУ ВНИИЭкологии), г. Москва, e-mail: [trubkin.ivan@bk.ru](mailto:trubkin.ivan@bk.ru)*

<sup>2</sup>*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,  
117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36, e-mail: [nemir@ocean.ru](mailto:nemir@ocean.ru)*  
Статья поступила в редакцию 13.10.2017, одобрена к печати 25.12.2017

По модифицированной методике с учетом подхода Харлоу и параметров ветровых волн для двух районов Карского моря проведен расчет последствий аварийного разлива судового топлива. Оценено количество выносимой на берег нефти после аварий в северном и южном участках моря в точках выброса с различным удалением от берега, а также рассчитаны площади и толщины пленок разлива на поверхности моря в различные моменты времени.

**Ключевые слова:** Карское море, судовое топливо, аварийный разлив, математическое моделирование, площадь разлива, толщина пленки

### Введение

Поступление нефти на морской берег может быть первым признаком аварийной ситуации с нефтяным загрязнением. Для определения необходимого масштаба мероприятий по очистке и привлечения соответствующей рабочей силы и выбора оборудования для ликвидации разлива необходим расчет пространственно-временных характеристик поля загрязнения на ранней стадии (Альхименко, 2004; Матишов и др., 2009; Патин, 2008, Становой и др., 2007). Особенно важно определить количество выброшенной на берег нефти, площадь и толщину пленки нефти на поверхности воды через несколько часов после аварии в условиях штормового ветра (Матишов и др., 2009). Достичь требуемой точности расчета можно только путем математического моделирования аварийных ситуаций (Становой и др., 2007; Трубкин, 2007). В этом случае в соответствии с современными представлениями об основных процессах распространения и физико-химической трансформации нефти должны учитывать: перенос под действием ветра и течений; растекание под действием сил плавучести и турбулентной диффузии; испарение; диспергирование; эмульгирование; изменение плотности и вязкости остатка на поверхности; осаждение на берега и дно.

Цель настоящих исследований: модельные расчеты пространственно-временных характеристик растекания нефти в случае аварийных разливов при штормовом ветре на прибрежных участках Карского моря. Названные характеристики отражают в первую очередь перенос и трансформацию разлива, а также количество нефти, выносимой на берег.

### Методика расчета

По условию, принятому при моделировании, предполагается выброс 100 тонн судового топлива с 1-часовой продолжительностью в северном и южном районах Карского моря (рис. 1).

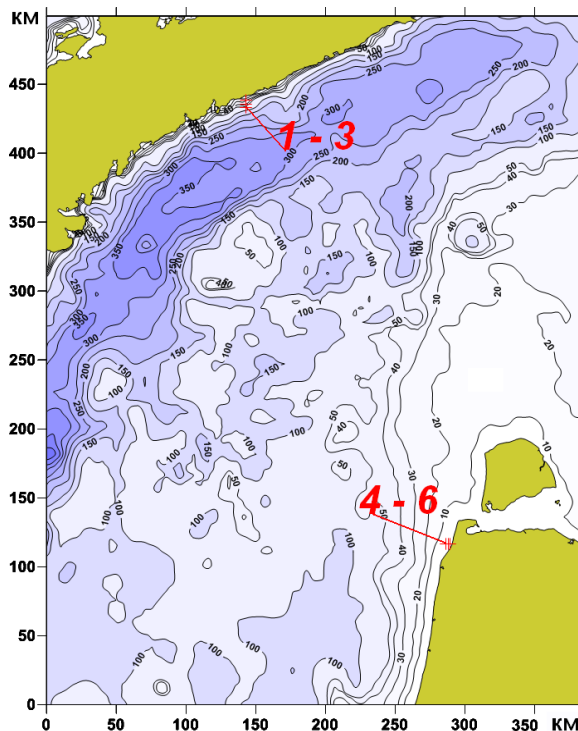


Рис. 1. Местоположение предполагаемых аварийных выбросов судового топлива (100 т, точки 1–6) с глубинами в районе работ в Карском море.

Дрейф пятна судового топлива отслеживается имитационным методом блуждающих частиц-маркеров (Озмидов, 1986). Эта методика была использована при расчетах переноса углеводородов в работах (Коротенко и др., 2003; Мишуков и др, 2007). Модель переноса топлива основана на системе дифференциальных уравнений Навье-Стокса для вязкой несжимаемой жидкости с учетом условия сохранения массы и количества движения в рассматриваемой области морской акватории. В имитационном методе блуждающих частиц-маркеров поле примеси (пятно нефти) задается совокупностью большого числа отдельных частиц, в каждой из которых содержится по одной условной единице примеси. Их количество в единичном квадрате моря определяет концентрацию примеси в данном районе. Частицы участвуют в двух типах движений: переносятся существующими морскими течениями и совершают флуктуации из-за турбулентных «добавок» к полю этих течений и волнения.

Вес вещества, выбрасываемого в море одновременно или распределенного во времени с известной интенсивностью, пропорционален количеству выпускаемых частиц-маркеров. Координаты маркеров описываются уравнениями:

$$\begin{aligned}\frac{\partial x}{\partial t} &= u_w(x, y, t) + u_p(x, y, t) + u_{pr}(x, y, t) + u'(x, y, t), \\ \frac{\partial y}{\partial t} &= v_w(x, y, t) + v_p(x, y, t) + v_{pr}(x, y, t) + v'(x, y, t), \\ \frac{\partial z}{\partial t} &= w(x, y, t) + w'(x, y, t),\end{aligned}\tag{1}$$

где  $u_w, u_p, u_{pr}, v_w, v_p, v_{pr}$  – горизонтальные компоненты скорости среднего переноса примеси, включающие ветровые, постоянные и приливные течения, полученные по измерениям или расчетам;  $u'(x, y, t), v'(x, y, t), w'(x, y, t)$  – соответствующие пульсационные “добавки” к средним скоростям, обуславливающие турбулентное рассеяние,  $w$  – скорость опускания компонентов примеси под действием силы тяжести.

Рассеяние частиц под действием пульсационных скоростей при их расчетах задается случайным вектором  $u', v'$ , компоненты которого описываются амплитудами вектора орбитальных скоростей ветрового волнения (Трубкин, 2007; Трубкин, Филиппов, 2003) и амплитудой турбулентного (диффузионного) рассеяние частиц, компоненты которого описываются нормальным законом (Озмидов, 1986). Практически в последнем случае такое задание осуществляется численно датчиком случайных чисел с заданной дисперсией. Значение дисперсии определяется данными пульсаций скоростей течений, измеренных в рассматриваемом районе.

При отсутствии или недостаточности экспериментальных данных дисперсии скоростей течений определяются на основе теории сдвиговой неустойчивости, связывающей дисперсию компонентов скорости с критерием Ричардсона. В простейшем случае турбулентность связывается со скоростью потока формулой, которая используется в практике при отсутствии натуральных измерений дисперсии скорости (Филиппов, 1997). На основе этого соотношения в настоящей работе используются следующие формулы расчета скорости турбулентных пульсаций:

$$\sigma_u = (1 + 0,196u + 0,076v)^{1/2}, \quad \sigma_v = (1 + 0,196v + 0,076u)^{1/2}, \quad \sigma_w = (\sigma_u^2 + \sigma_v^2)^{1/2},$$

где:  $u, v$  – составляющие средней скорости.

Несмотря на то, что используемый имитационный метод блуждающих частиц-маркеров весьма прост в понимании выполняемых процедур, однако он приводит к большим затратам времени при вычислениях. Поэтому этот метод был модифицирован с учетом ранее известного приема расчета, как лагранжево-эйлеров подход Харлоу (Harlow, 1965). Суть этого подхода заключается в том, что источник взвеси задается набором частиц-маркеров, перемещающихся относительно неподвижной эйлеровой расчетной сетки, которая разбивается на квадратные ячейки. Элементы взвеси в ячейке представляют собой набор частиц, которые могут свободно перемещаться через сетку, но не через твердую границу. На первом

этапе расчета определяется поле скоростей дрейфа в эйлеровой системе координат. Значения вектора скорости дрейфа отсчитываются от центра ячеек. На втором этапе ведется расчет перемещения частиц, положение которых внутри ячейки определено соответствующими координатами Лагранжа. Скорость каждой частицы находится путем линейной интерполяции между центрами соседних ячеек. Частицы, вышедшие из области через «жидкую» границу, из расчета исключаются. На твердых границах используется условие полного отражения. Подход, предложенный в свое время Харлоу (Harlow, 1965) для решения задач гидродинамики, в данном случае позволил существенно ускорить вычисления.

При расчетах были использованы метеорологические данные (Справочник..., 1966–1968; Справочные данные..., 2009) возможных скоростей и направлений ветра с различной обеспеченностью для 8 румбов направлений ветра (табл. 1). По выбранным величинам скоростей, направлений ветра и батиметрическим данным были рассчитаны поля течений, ветровых и инфрагравитационных волн (Трубкин, 2007), а затем поля аварийного разлива и его некоторые параметры: площадь разлива; стандартное отклонение длины пятна разлива, среднее и максимальное значения толщины пленки.

Ежегодная повторяемость скорости ветра в районе лицензионных участков Карского моря

| Направления   | С    | СВ   | В    | ЮВ   | Ю    | ЮЗ   | З    | СЗ   |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Скорость, м/с | 21,7 | 20,5 | 20,8 | 22,5 | 23,4 | 22,8 | 22,5 | 22,5 |

### Результаты

Согласно используемому методу, в условиях штормового ветра через 4 часа после начала выброса площадь пятна увеличивается (рис. 2а) и может достичь береговой

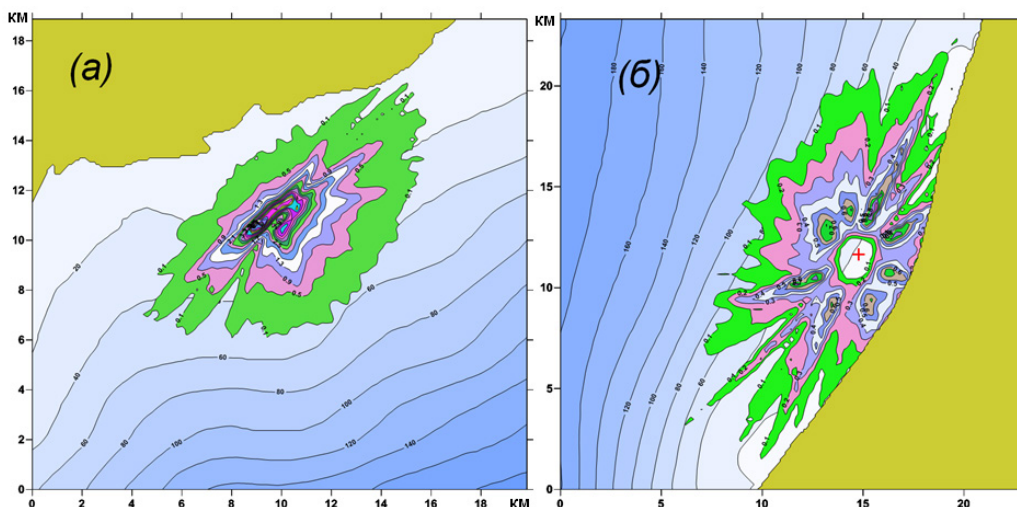


Рис. 2. Толщина пленки нефти ( $m^3$ ) судового топлива на поверхности воды северного (а) и южного (б) участков Карского моря после аварии в точках 2 и 5 в условиях штормового ветра через 4 часа от начала выброса (местоположение точек приведено на рис. 1).

зоны (рис. 2б). Масштаб воздействия разлива на водную среду и побережье зависит от интенсивности процессов выветривания судового топлива, его летучих фракций в атмосферу. Известные модельные оценки показывают (АМАР, 2007), что процессы выветривания являются наиболее значимыми над всей арктической территорией.

Кроме того, оказывает влияние поступление капель с поверхности в водную толщу за счет процессов обрушения волн и вертикального перемешивания. Минимальное выветривание соответствует периодам со слабыми скоростями ветра и практически полностью определяется испарением летучих фракций из пятна разлитого топлива. Максимальное выветривание происходит при сильном ветре, когда большая часть топлива попадает в виде капель в водную толщу. Интенсивность и конечный результат испарения фракций из нефтяного слика зависят, прежде всего, от температуры поверхности моря и свойств нефти (Измайлов, 1999). Фракции с температурой кипения до 150°C испаряются в течение первых суток, чуть позже – фракции с температурой кипения до 200°C. В летний и осенний периоды интенсивность испарения выше.

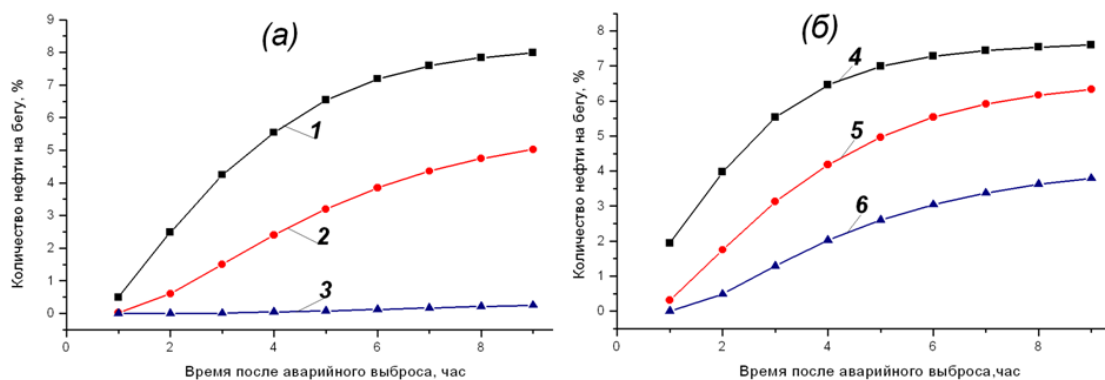


Рис. 3. Количество (%) выносимой на берег нефти после аварии в Карском моря в период времени от 1 до 9 часов после гипотетического разлива: (а) – в северном участке в точках 1–3 с удалением от берега: 1–2,96; 2–5,62; 3–8,29 км; (б) – в южном участке в точках 4–6 с удалением от берега: 4–1,53; 5–3,06; 6–4,60 км.

Полученные оценки растекания пятен судового топлива по поверхности воды участков Карского моря в случае аварийных разливов при штормовом ветре позволили определить количество выносимой на берег нефти (рис. 3), которое зависит от расстояния до берега точки выброса. Согласно расчетам, в рассматриваемом случае при минимальном удалении (около 3-х км) достигает берега лишь 8% от веса вылитого топлива. При максимальном удалении (8,3 км) аварийного выброса до 100 тонн в прибрежной зоне ощутимой угрозы выноса на берег нефти не наблюдается.

Пленка нефти с наименьшим удалением от берега (рис. 3а, кривая 1) примерно на один час является более коротко живущей, чем другие (рис. 3а, кривые 2 и 3). Такая тенденция характерна также для южного участка Карского моря (рис. 3б, кривые 4–6).

Оценка площади разлива, превышающей по толщине пленки нефти на поверхности более  $0,2 \cdot 10^{-6}$  м, представлена на рис. 4.

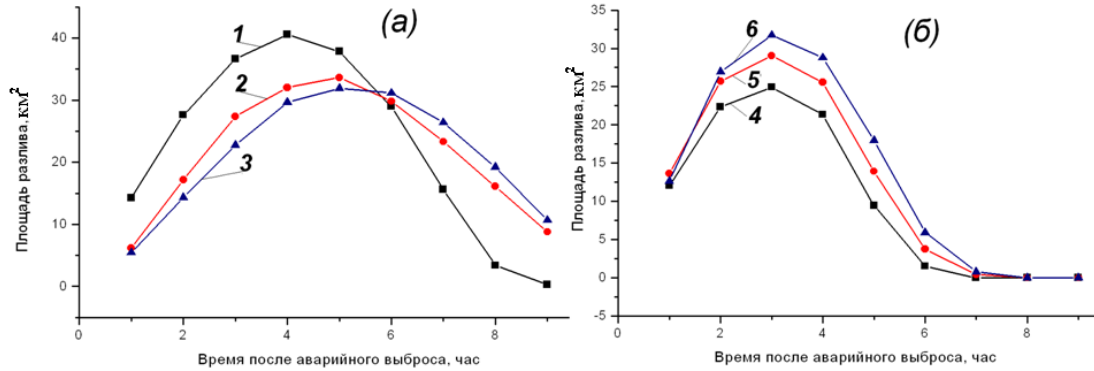


Рис. 4. Площадь разлива нефти (км<sup>2</sup>, при толщине пленки на поверхности более  $0,2 \cdot 10^{-6}$  м) после аварии в период времени от 1 до 9 часов гипотетического разлива: (а) – в северном, (б) – в южном участках. Расстояние от берега такое же, как на рис. 3.

В качестве некоторой суммарной величины рассеивания пространственного переноса блуждающих частиц-маркеров в рамках используемого метода нами выбрана величина среднеквадратического (стандартного) отклонения флуктуаций маркеров, характеризующая длину разлива в направлении его переноса (рис. 5). Изменчивость длины пятна разлива нефти на поверхности воды, характеризуемая стандартным отклонением, аналогична тенденции изменчивости кривых, обозначенных на рис. 4. Поэтому суммарная величина рассеивания пространственного переноса блуждающих частиц-маркеров, характеризуемых величиной среднеквадратического (стандартного) отклонения их флуктуаций, длину разлива в направлении его переноса (рис. 5 а, кривая 1) является примерно на один час более коротко живущей, чем другие (рис. 5 а, кривые 2 и 3). Такая тенденция характерна также для южного участка Карского моря (рис. 5б, кривые 4–6).

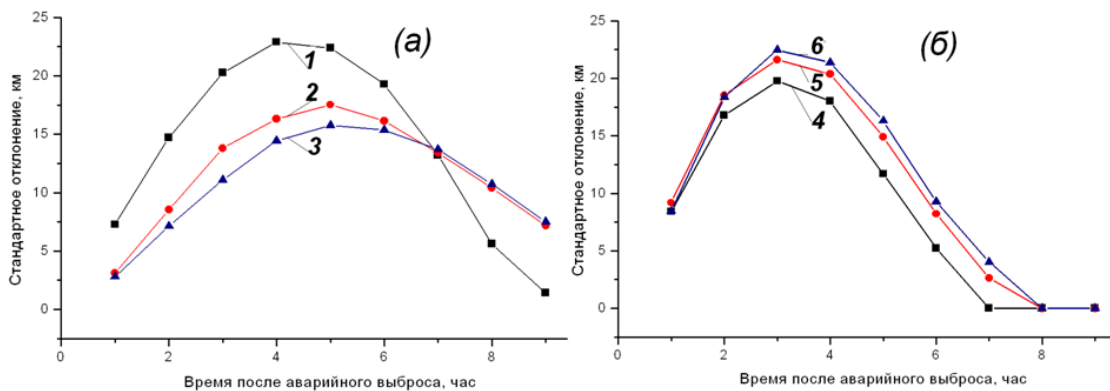


Рис. 5. Стандартное отклонение длины (км) пятна разлива нефти на поверхности воды после аварии в период времени от 1 до 9 часов гипотетического разлива: (а) – в северном, (б) – в южном участках Карского моря. Расстояние от берега такое же, как на рис. 3.

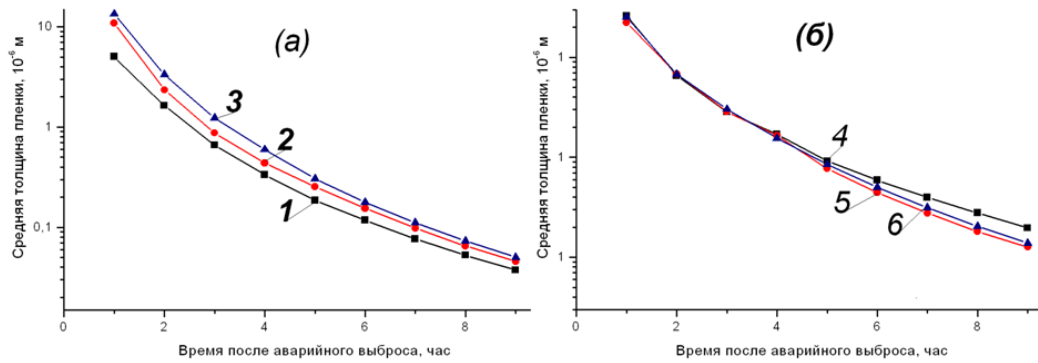


Рис. 6. Средние значения толщины пленки ( $10^{-6}$  м) пятна разлива нефти на поверхности воды после аварии в период времени от 1 до 9 после часов гипотетического разлива: (а) – в северном, (б) – в южном участках Карского моря. Расстояние от берега такое же, как на рис. 3.

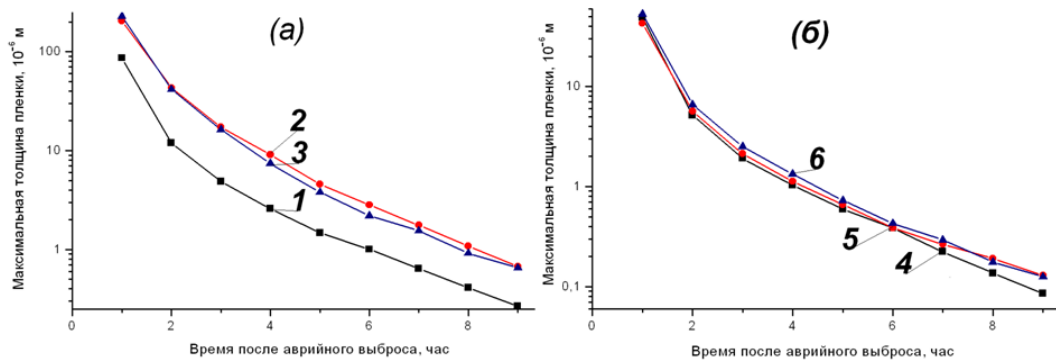


Рис. 7. Максимальные значения толщины пленки ( $10^{-6}$  м) пятна разлива нефти на поверхности воды после аварии в период времени от 1 до 9 после часов гипотетического разлива: (а) – в северном, (б) – в южном участках Карского моря. Расстояние от берега такое же, как на рис. 3.

Согласно полученным результатам (рис. 6 и 7). средние и максимальные значения толщины пленки в некоторый период времени после аварии имеют равную тенденцию изменчивости, но несколько различаются количественно по соотношению между ними. Видимо, это различие связано с характером вынуждающих сил в северном и южном участках Карского моря, формирующих перенос нефтяного пятна. Эти результаты расчетов представляют интерес при мероприятиях по мониторингу, локализации и ликвидации разлива.

### Выводы

Средние и максимальные значения толщины пленки нефти в некоторый период времени после аварии имеют одинаковую тенденцию изменчивости. Их количественные различия связаны с особенностями северного и южного участков Карского моря.

Результаты расчетов отражают пространственно-временную картину развития аварийной ситуации и позволяют выбрать обоснованную стратегию борьбы с разливом нефти или судового топлива.

Количество выносимой на берег нефти зависит от удаления от берега точки выброса. В рассматриваемом случае берега достигает лишь 8% от веса вылитой нефти при минимальном удалении на 1,53–2,96 км. При максимальном удалении аварийного выброса до 100 тонн в прибрежной зоне на расстояниях свыше 8,3 км ощутимой угрозы выноса на берег нефти не наблюдается.

Средние и максимальные значения толщины пленки нефти в некоторый период времени после аварии имеют одинаковую тенденцию изменчивости. Их количественные различия связаны с особенностями северного и южного участков Карского моря.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема № 0149-2018-0016), при частичной поддержке РФФИ (проект № 17-05-00356).

### Литература

- Альхименко А.И.* Аварийные разливы нефти в море и борьба с ними. СПб: ОМ-Пресс, 2004. 213 с.
- Измайлов В.В.* Перенос и трансформация нефтяного загрязнения Северного Ледовитого океана // СПб: Гидрометеоздат, 1999. 140 с.
- Коротенко К.А., Дитрих Д.Е., Боуман М.Дж.* Моделирование циркуляции и переноса нефтяных пятен в Черном море // *Океанология*. 2003. Т. 43, № 4. С. 504–515.
- Матишов Г.Г., Бердников С.В., Савицкий Р.М.* Экосистемный мониторинг и оценка воздействия разлива в Керченском проливе. // *Авария судов в ноябре 2007 г.* Ростов-на-Дону: ЮНЦ РАН, 2009. 78 с.
- Мишуков В.Ф., Калинин В.В., Мишукова Г.И.* Модель расчета переноса и трансформации нефтяного загрязнения в Дальневосточных морях (на примере залива Петра Великого Японского моря) // *Дальневосточные моря России. Исследование морских экосистем и биоресурсов*. М.: Наука, 2007. С. 345–353.
- Озмидов Р.В.* Диффузия примесей в океане. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 278 с.
- Патин С.А.* Нефтяные разливы и их воздействие на морскую среду и биоресурсы. М.: ВНИРО, 2008. 506 с.
- Справочные данные по режиму ветра и волнения Японского и Карского морей* // *Российский морской регистр судоходства*, СПб, 2009. 356 с.
- Становой В.В., Лавренов И.В., Неглов И.А.* Система моделирования разливов нефти в ледовитых морях // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2007. Вып. 77. С. 6–7.
- Справочник по климату СССР*. Л., Гидрометеоздат, Вып. 13. Части II–IV. С. 1966–1968.
- Трубкин И.П.* Ветровое волнение (взаимосвязи и расчет вероятностных характеристик) // М.: Научный мир, 2007. 264 с.
- Трубкин И.П., Филиппов Ю.Г.* Методика и некоторые результаты расчета ветровых волн в Балтийском море при оценке воздействия на окружающую среду // *Экологические системы и приборы*. 2003. № 12. С. 46–50.
- Филиппов Ю.Г.* Численное исследование колебаний уровня и течений северной части Каспийского моря при различных значениях его фонового уровня // *Водные ресурсы*. 1997. Т. 24. № 4. С. 424–429.



AMAP (Arctic Monitoring and Assessment Programme). Chapter 4 Sources, Inputs and Concentrations of Petroleum Hydrocarbons, Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, and other Contaminants Related to Oil and Gas Activities in the Arctic. Oslo: AMAP, 2007. 87 p.

Harlow F.H., Welch J.E. Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface // *Phys. Fluids*. 1965. Vol. 8. P. 2182–2189. doi: 10.1063/1.1761178.

## CALCULATION OF SPATIAL-TIME CHARACTERISTICS OF EMERGENCY SPILL OF SHIP FUEL IN THE COASTAL ZONE OF THE KARA SEA

I.P. Trubkin<sup>1</sup>, I.A. Nemirovskaya<sup>2</sup>

<sup>1</sup>All-Russian Scientific Research Institute of Ecology. Moscow, 117628.

Znamiskie-Sadki, e-mail: [trubkin.ivan@bk.ru](mailto:trubkin.ivan@bk.ru)

<sup>2</sup>Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 36, Nakhimovskiy prospect,

Moscow, 117997, Russia, e-mail: [nemir@ocean.ru](mailto:nemir@ocean.ru)

Submitted 13.10.2017, accepted 25.12.2017

The consequences of an emergency spill of marine fuel are calculated, based on the modified method, taking into account the Harlow approach and the parameters of wind, infra-gravity, reflected waves for two regions of the Kara Sea. The amount of oil delivered ashore after the accidents in the northern and southern parts of the sea is estimated in the emission points with various distances from shore, as well as The amount of oil delivered ashore after the accidents in the northern and southern parts of the sea at the emission points with various distances from shore is estimated, and the areas and thicknesses of oil slicks on the sea surface are calculated at various times.

**Keywords:** Kara Sea ship fuel, emergency spill, mathematical modeling, area of spill, surface film, thickness

### Referenses

Al'khimenko A.I., *Avariynnye razlivy nefti v more i bor'ba s nimi*, S-Peterburg, OM-Press, 2004, 213 p. (Alhimenko, A.I. Accidental oil spills in the sea and fight with them, S-Peterburg, OM-Press, 2004, 213 p.)

AMAP (Arctic Monitoring and Assessment Programme), Chapter 4 Sources, Inputs and Concentrations of Petroleum Hydrocarbons, Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, and other Contaminants Related to Oil and Gas Activities in the Arctic, Oslo, AMAP, 2007, 87 p.

Filippov Yu.G., Modeling the circulation and transport of oil spills in the Black Sea, *Water Resources*, 1997, Vol. 24, No. 4, pp. 386–391.

Harlow F.H., Welch J.E., Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface, *Phys. Fluids*, 1965, Vol. 8, pp. 2182–2189, doi: 10.1063/1.1761178.

Izmaylov V.V., *Perenos i transformatsiya neftyanogo zagryazneniya Severnogo Ledovitogo okeana*, S-Peterburg, Gidrometeoizdat, 1999, 140 p. (Transfer and transformation of oil pollution of the Arctic Ocean, S-Petersburg, Gidrometeoizdat, 1999, 140 p.)

Korotenko K.A., Dietrich D.E., Bowman M.J., Numerical investigation of the level fluctuations and currents in the Northern Caspian Sea for various background levels, *Oceanology*, 2003, Vol. 43, No. 4, pp. 474–484.

- Matishov G.G., Berdnikov S.V., Savitskiy R.M.*, Ekosistemnyy monitoring i otsenka vozdeystviya razliva v Kerchenskom prolive. Avariya sudov v noyabre 2007, Rostov-na-Donu, YUNTS RAN, 2009, 78 p. (Ecosystem monitoring and assessment of the impact of the spill in the Kerch Strait. Ship Accidents in November 2007, Rostov-on-Don, UNSC RAS, 2009, 78 p.).
- Mishukov V.F., Kalinchuk V.V., Mishukova G.I.*, Model' rascheta perenosa i transformatsii neftyanogo zagryazneniya v Dal'nevostochnykh moryakh (na primere zaliva Petra Velikogo Yaponskogo morya). Dal'nevostochnyye morya Rossii. Issledovaniye morskikh ekosistem i bioresursov, Moskva, Nauka, 2007, 699 p. (A model for calculating the transport and transformation of oil pollution in the Far Eastern Seas (the example of the Peter the Great Bay of the Sea of Japan), The Far Eastern seas of Russia, Research of marine ecosystems and bioresources, Moscow, Nauka, 2007, 699 p.)
- Ozmidov R.V.*, Diffuziya primesey v okeane. Leninrad, Gidrometeoizdat, 1986. 278 p. (Diffusion of impurities in the ocean, Leninrad, Gidrometeoizdat, 1986, 278 p.)
- Patin S.A.*, Neftnyanye razlivy i ikh vozdeystviye na morskuyu sredu i bioresursy, Moskva, VNIRO, 2008, 506 p. (Oil spills and their impact on the marine environment and bioresources, Moscow, VNIRO, 2008, 506 p.).
- Spravochnyye dannyye po rezhimu vetra i volneniya Yaponskogo i Karskogo morey, Rossiyskiy morskoy registr sudokhodstva, Sankt-Peterburg, 2009, 356 p. (Reference data on the regime of wind and waves in the Japan and Kara Seas. Russian Maritime Register of Shipping, St. Petersburg, 2009, 356 p.).
- Spravochnik po klimatu SSSR, Leningrad, Gidrometeoizdat, Vyp. 13, Chasti II-IV 1966–1968 (Reference book on the climate of the USSR, Leninrad, Gidrometeoizdat, Iss. 13, Parts II-IV of 1966–1968).
- Stanovoy V.V., Lavrenov I.V., Neelov I.A.*, Sistema modelirovaniya razlivov nefti v ledovityh moryah, *Problemy Arktiki i Antarktiki*, 2007, Vol. 77. pp. 6–7.
- Trubkin I.P.*, Vetrovoye volneniye (vzaimosvyazi i raschet veroyatnostnykh kharakteristik), Moskva, Nauchnyy Mir, 2007, 264 p. (Wind turbulence (interrelations and calculation of probability characteristics), Moscow, Scientific World, 2007, 264 p.)
- Trubkin I.P., Filippov Yu.G.*, Metodika i nekotoryye rezul'taty rascheta vetrovykh voln v Baltiyskom more pri otsenke vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredu, *Ekologicheskkiye sistemy i pribory*, 2003, No.12, pp. 46–50 (The methodology and some results of calculating wind waves in the Baltic Sea in assessing the impact on the environment. *Ecological systems and devices*, 2003, No.12, pp. 46–50).