

## ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ

УДК 551.648

DOI: 10.30758/0555-2648-2018-64-4-439-454

### МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОСЛЕДСТВИЙ СВЕРХПРОДОЛЖИТЕЛЬНЫХ АВАРИЙ НА ОБЪЕКТАХ НЕФТЕДОБЫЧИ В АРКТИЧЕСКОМ РЕГИОНЕ

С.Н. ЗАЦЕПА<sup>1\*</sup>, А.А. ИВЧЕНКО<sup>1</sup>, В.В. СОЛБАКОВ<sup>2</sup>, В.В. СТАНОВОЙ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> — Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова, Москва, Россия

<sup>2</sup> — ФИЦ «Информатика и управление» РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup> — ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

\*zatsepa@gmail.com

### A METHOD FOR MODELING OF THE CONSEQUENCES OF SUPER-CONTINUOUS ACCIDENTS ON OIL PRODUCTION OBJECTS IN THE ARCTIC REGION

S.N. ZATSEPA<sup>1\*</sup>, A.A. IVCHENKO<sup>1</sup>, V.V. SOLBAKOV<sup>2</sup>, V.V. STANOVY<sup>3</sup>

<sup>1</sup> — Zubov State Oceanographic Institute, Moscow, Russia.

<sup>2</sup> — Federal Research Center «Information and Management» RAS, Moscow, Russia.

<sup>3</sup> — State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

\*zatsepa@gmail.com

Received August, 14, 2018

Accepted December, 5, 2018

*Keywords:* mathematical modelling, oil spills, long-lasting oil spill accidents.

#### Summary

The elimination of the oil spill at the DWH (Deep-Water Horizon) well in the Gulf of Mexico took place in almost ideal hydrometeorological conditions, which did not create serious difficulties for the operation of the response forces and means. There is a problem of assessing the possible consequences of an accident of this scale in the Arctic conditions. The simulation method of a long-lasting oil spill in the ice infested region is considered. A new model for the spreading of an elementary spill (ES) is described. A total oil spill is constructed as superposition of a number of elementary spills. Taking into account the transport of oil by drifting ice, the potential impact of spills on vulnerable areas in the sea and coasts can reach distance of hundreds and thousands of kilometers. The distribution of ES on the surface of ice-free water is limited by the lifetime, depending on the

Citation: Zatssepa S.N., Ivchenko A.A., Solbakov V.V., Stanovoy V.V. A method for modeling of the consequences of super-continuous accidents on oil production objects in the Arctic region. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2018, 64, 4: 439–454. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2018-64-4-439-454

properties of oil and regional hydro-meteorological conditions and elongated by the duration of the ice capture. The paper presents examples of estimating the lifetime of an ongoing oil spill in open water conditions based on the analysis of wind conditions in the area of interest by long-term series of meteorological reanalysis. On the basis of the analysis, an efficient computational algorithm to estimate the probability of a long-lasting oil spills impact on specially protected natural areas is constructed.

Поступила 14 августа 2018 г.

Принята к печати 5 декабря 2018 г.

*Ключевые слова:* математическое моделирование, разливы нефти, сверхпродолжительные аварии.

В работе предложен метод моделирования сверхпродолжительных выбросов нефти из аварийных скважин на морском шельфе. С учетом транспорта нефти ледяными полями область потенциального воздействия разливов на уязвимые объекты на акватории и побережьях может составлять сотни и тысячи километров. Для реализации концепции риск-анализа распространения нефти в этом случае в работе предложен метод моделирования с помощью совокупности последовательных элементарных разливов (ЭР), распространение которых на открытой воде ограничено временем жизни, зависящим от свойств нефти и региональных гидрометеорологических условий. На основании проведенного анализа построен эффективный вычислительный алгоритм для оценки вероятности воздействия продолжительного разлива нефти на уязвимые объекты природной среды.

## ВВЕДЕНИЕ

Ликвидация разлива<sup>1</sup> нефти на скважине DWH (Deep Water Horizon) в Мексиканском заливе проходила практически в идеальных гидрометеорологических условиях, не создававших серьезных трудностей для работы сил и средств реагирования. Иная ситуация может сложиться в Арктической зоне, где проводятся активные исследования, разведка, добыча и транспортировка углеводородов на континентальном шельфе. Метеорологические и ледовые условия могут осложнять восстановление контроля над аварийной скважиной и препятствовать ликвидации разлива, приводя к тяжелым экологическим последствиям.

Возникает вопрос об оценке возможных последствий аварии подобного масштаба в арктических условиях. Чтобы учесть сезонные и межсезонные особенности такой аварии (фонтанирование скважины), необходимо рассмотреть эволюцию достаточно длительного разлива. Учитывая технические сложности при ремонте объектов нефтегазового комплекса в Арктике, продолжительность неконтролируемого истечения нефти может составлять год и более. Обозначим такую аварию как сверхпродолжительную, или «запроектную», оставляя в стороне вопросы о возможности и вероятности ее возникновения на конкретных месторождениях и о принимаемых мерах реагирования.

Разработка комплекса мероприятий по минимизации последствий «запроектных» аварий должна основываться на анализе различных вариантов распространения разливов нефти. В первую очередь следует ответить на вопрос: что будет, если в течение продолжительного промежутка времени локализация разлива по ряду причин будет невозможна. Нет сомнений, что подобный результат не следует получать экспериментальным путем, и логичным методом исследования остается математическое моделирование [1–3].

<sup>1</sup> Слово сочетание «разлив нефти» употребляется в статье по отношению и к процессу, и к объекту. Нефть на поверхности моря называется «разлив нефти на поверхности моря», имея в виду происхождение этого вида загрязнения, продолжающийся *разлив* нефти — здесь имеется в виду процесс истечения нефти из источника.

В целом моделирование должно дать ответы на вопросы:

- что может увидеть наблюдатель, например, с помощью средств дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в любой момент времени после начала разлива;
- что можно обнаружить в конкретном районе побережья после окончания разлива;
- в каких районах моря наиболее вероятны высокие уровни загрязнения;
- как воздействие на окружающую среду зависит от продолжительности действия аварийной скважины.

Расчеты распространения нефтяного пятна на длительные сроки (неделя, месяц, год) осуществляются на основе реконструированных гидрометеорологических условий для региона интереса с использованием данных реанализа метеорологических полей и гидродинамического моделирования гидрологических характеристик, включая характеристики ледовых условий.

### МЕТОДОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Принимая во внимание невозможность предсказания времени гипотетической аварии, необходимо рассмотреть разнообразные гидрометеорологические сценарии распространения нефти от источника сброса, который может активизироваться в любой день года, как зимой, так и летом. Учитывая продолжительность рассматриваемого разлива и ледовые условия в арктической зоне, оценки возможных последствий следует проводить для области, простирающейся на сотни и тысячи километров от источника. Продолжительный разлив нефти в море от локализованного источника не может быть описан в терминах траектории распространения, так как лишь его отдельные части могут быть описаны индивидуальными траекториями. Продолжительный разлив описывается как совокупность последовательных конфигураций нефтяного загрязнения на поверхности моря в конкретный момент времени. На открытой воде конфигурация нефтяного пятна на поверхности моря формируется совокупным действием ветра и течений, а в ледовых условиях с учетом дрейфа и нарастания/таяния ледового покрова. Когда разлив нефти происходит на открытой воде, то в результате выветривания поверхностная нефтяная пленка со временем разрушается. Для залповых выбросов нефти или выбросов, имеющих ограниченную продолжительность, можно определить время существования разлива на поверхности моря. Назовем временем жизни для разлива ограниченной продолжительности промежуток времени между моментом появления нефти и моментом ее исчезновения с поверхности моря в результате процессов выветривания. Впервые понятие «времени жизни» по отношению к залповому сбросу на поверхность моря было введено в работе [4], где оказалось удобным для описания распространения нефтяного загрязнения как пассивной неконсервативной примеси. Для продолжительных или продолжающихся разливов нефти в море всегда наступает момент, когда поступление нефти на поверхность в районе источника сброса уравновешивается его удалением с постоянно растущей площади поверхностного загрязнения за счет процессов испарения, растворения, диспергирования в водную толщу и других процессов деградации. Вышеуказанный баланс между притоком и оттоком нефти наступает через разное время, зависящее от интенсивности истечения нефти, ее свойств и ветровых условий. Таким образом, и залповые, и продолжающиеся разливы нефти на морскую поверхность можно характеризовать временной характеристикой, для удобства изложения называемой «временем жизни разлива», которая может быть определена методами, рассмотренными ниже.

При разливе подо льдом происходит захват всплывшей нефти ледовым полем за счет вмораживания в ледяной покров и транспорт вместе с дрейфующим льдом до момента таяния. В этих условиях возможно частичное испарение легких фракций в результате попадания нефти в разводья между льдинами. Диспергирование нефти уменьшается по причине ограниченного развития ветровых волн в пространствах между льдинами. Таким образом, процессы, отвечающие за удаление нефти с морской поверхности, в значительной степени замедляются, а после таяния льда действуют в полной мере, поскольку нефть оказывается в условиях открытой воды.

В результате «время жизни» разлива увеличивается на промежуток времени «ледового плена», который может составлять несколько месяцев, а область распространения нефтяного загрязнения от источника сброса возрастает за счет дрейфа во льду.

Когда речь идет о реконструкции уже произошедшей аварии, связанной с утечкой в море нефти, то задача слежения за разливом решается стандартным расчетом распространения нефти, даже в условиях продолжительного сброса. Иная ситуация при рассмотрении гипотетической аварии, последствия от которой могут быть существенно различными в зависимости от момента времени гипотетической аварии на объекте нефтедобычи. Вместо одной последовательности состояний<sup>2</sup> разлива в различные моменты времени после начала разлива необходимо рассмотреть десятки тысяч подобных вариантов. Но, с другой стороны, представим себе два гипотетических разлива, отличающихся только временем старта на 1 день, положим, 1 и 2 мая. Резонно предположить, в любой момент времени после начала сброса нефти на поверхность моря эти два разлива будут полностью идентичны, как показано на схематизированном рис. 1 а, кроме части Е (А, В, С, D, Е — дневные порции), которая отсутствует у более позднего разлива, стартовавшего «по сценарию» 2 мая. Часть разлива Е (рис. 1 а, в) будем называть периферийной, хотя, вообще говоря, под периферией пятна нефти можно понимать любую часть разлива вблизи линии тройного контакта — нефть–вода–воздух. В данной статье периферийная часть разлива соответствует наиболее удаленной от источника части.

Таким образом, есть некоторые основания, чтобы представлять любой продолжительный разлив как состоящий из отдельных фрагментов или порций нефти, попавших на поверхность моря в течение заданного промежутка времени  $\tau$ , как показано на рис. 1 б. Каким может быть этот промежуток времени? С одной стороны, чтобы описать длительный разлив нефти, каждая порция нефти с объемом  $\Delta V$ , его составляющая, должна быть много меньше, чем общий объем сброса  $V$ , а промежуток времени  $\tau$  много меньше общей продолжительности сброса  $T$ . С другой стороны, расчет и последующее хранение результатов при распространении большого количества порций или элементарных разливов (ЭР) имеет следствием большие вычислительные затраты.

Распространенным приемом при моделировании продолжительных разливов нефти является представление в виде последовательности залповых выбросов (рис. 1 в), выходящих из источника через некоторые, как правило, равные промежутки времени. Часто эти выбросы называют спиллетами (*spillet* — маленький разлив нефти) и применяют для расчета площади каждого спиллета соотношения Фэя [5, 6]. Насколько корректно в этом случае оценивается площадь нефтяного пятна?

<sup>2</sup> Под состоянием разлива здесь и далее будем понимать его конфигурацию на поверхности моря, количество нефти, попавшей в морскую среду, испарившейся в атмосферу.

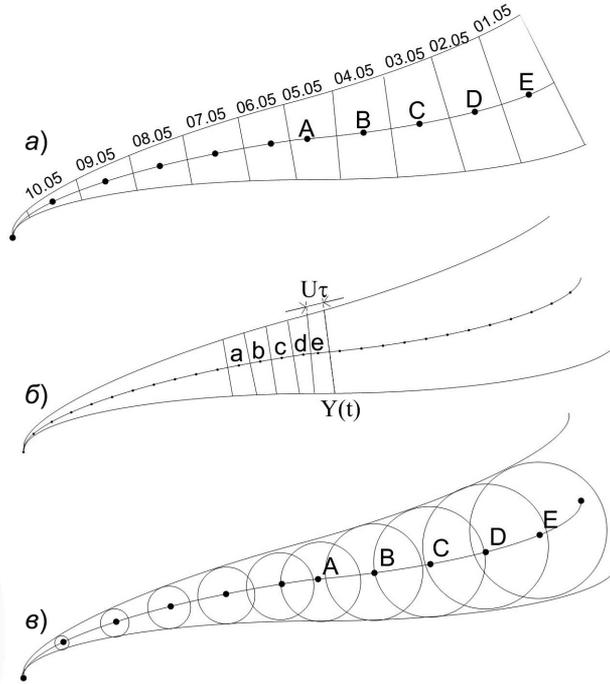


Рис. 1. Схематизации продолжительного разлива серией последовательных порций  
 Fig. 1. Schemes of super-continuous spillby means of a set of consecutive elementary spills

Представим объем нефти  $V$ , поступающей на поверхность от источника сброса за время  $t$ , как сумму последовательных порций объемом  $V_n$

$$V = Qt = \sum_{n=1}^N V_n, \quad (1)$$

где  $Q$  — интенсивность выброса.

Каждая порция нефти эволюционирует независимо, и изменение ее площади  $A_n(t)$  в соответствии с [5] рассчитывается как

$$A_n(t) = 6,6 \cdot \underbrace{\left(\frac{\gamma g}{\nu_w^{0,5}}\right)^{\frac{1}{3}}}_{k} V_n^{\frac{2}{3}} t^{\frac{1}{2}} = k V_n^{\frac{2}{3}} t^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

где  $\gamma = (\rho_w - \rho_{oil})/\rho_w$ ,  $\rho_w$  — плотность воды,  $\rho_{oil}$  — плотность нефти,  $V_n$  — объем порции нефти;  $g$  — ускорение свободного падения,  $\nu_w$  — кинематическая вязкость воды,  $t$  — время от начала сброса.

Учитывая, что в продолжающемся разливе в море отдельные порции нефти появляются на поверхности не одновременно, а со сдвигом во времени, зависящим от количества «порций»  $N$ , то в каждый момент времени  $t$  площадь нефтяного пятна  $A(t)$ , определенную по сумме площадей отдельных порций  $A_n(t)$  или элементарных разливов, можно оценить как

$$A(t) = \sum_{n=1}^N A_n(t) = \sum_{n=1}^N A_n(n\tau) = \sum_{n=1}^N A_n\left(t \frac{n}{N}\right) = k V_n^{\frac{2}{3}} t^{\frac{1}{2}} \sum_{n=1}^N \left(\frac{n}{N}\right)^{\frac{1}{2}} = k \left(\frac{V}{N}\right)^{\frac{2}{3}} t^{\frac{1}{2}} \sum_{n=1}^N \left(\frac{n}{N}\right)^{\frac{1}{2}}. \quad (3)$$

Учитывая, что приближенное значение суммы ряда в (3) (см. [7])

$$\sum_{n=1}^N \left( \frac{n}{N} \right)^{\frac{1}{2}} \approx \frac{2}{3} N \quad (\text{численная оценка}), \quad (4)$$

получим, что сумма площадей элементарных разливов зависит в любой момент времени  $t$  от разбиения на  $N$  отдельных порций:

$$A(t) \approx k \frac{2}{3} N (V^{\frac{2}{3}}) N^{-\frac{2}{3}} t^{\frac{1}{2}} \approx \frac{2}{3} k (V^{\frac{2}{3}}) t^{\frac{1}{2}} N^{\frac{1}{3}}. \quad (5)$$

Полученный результат означает, что применение соотношений Фэя [5], полученных для залпового сброса нефти на поверхность, для расчетов площади пятна может привести к существенным ошибкам.

В работе [8] была получена оценка для площади продолжающегося разлива нефти на течении

$$A(t) \approx 2 \frac{2p+3}{p+3} \underbrace{\left[ \frac{p+3}{p} \right]^{\frac{p}{3p}} \left[ \frac{1}{8s^2(p+1)} \right]^{\frac{1}{p+3}}}_{\delta} \left[ \rho_{oil} g' Q^2 / (\beta) \right]^{\frac{1}{p+3}} U^{\frac{p+1}{p+3}} t^{\frac{2p+3}{p+3}}, \quad (6)$$

где  $g' = g(\rho_w - \rho_{oil})/\rho_w$  — редуцированное ускорение силы тяжести,  $\rho_{oil}$  и  $\rho_w$  — плотность нефти и воды соответственно,  $Q$  — интенсивность истечения (расход),  $U$  — скорость течения,  $\beta$  — эмпирический коэффициент,  $p$  — показатель степени, зависящий от выбранной модели трения нефти о воду при растекании,  $s$  — коэффициент формы [8].

Увеличение полуширины нефтяного шлейфа  $Y(t)$  описывается соотношением

$$Y(t) = \underbrace{\left[ \frac{p+3}{p} \right]^{\frac{p}{3p}} \left[ \frac{1}{8s^2(p+1)} \right]^{\frac{1}{p+3}}}_{\delta} \left[ \frac{\rho_{oil} g' Q^2}{\beta U^2} \right]^{\frac{1}{p+3}} t^{\frac{p}{p+3}}. \quad (7)$$

Если деление на фрагменты (или порции, или элементарные разливы) провести с использованием результатов [8], предполагая, что каждая часть разлива не обязательно имеет круглую форму, а может ассоциироваться с фрагментами (рис. 1 б), условно — прямоугольниками со сторонами  $2Y(t)$  в поперечном к направлению течения и  $Ut$  в продольном, то оценка площади всего разлива по площадям отдельных фрагментов будет инвариантна относительно числа порций, по крайней мере для постоянного течения в точке выброса нефти:

$$A(t) = \sum_1^N A_n(t) = \sum_1^N \underbrace{U \tau}_{dx} \cdot 2Y_n(U n \tau, n \tau) \approx 2 \int_0^{X(t)} Y(x, t) dx, \quad (8)$$

где  $X(t) = Ut$  в случае постоянного течения.

Определив возможность описания продолжительного разлива как совокупности отдельных частей, можно попытаться оценить «время жизни» для каждой порции как, например, время, необходимое для уменьшения средней толщины отдельной порции нефти до субмикронных толщин.

#### ОЦЕНКА «ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ» ДЛЯ ЭЛЕМЕНТАРНОГО РАЗЛИВА

Уменьшение толщины по оси нефтяного шлейфа без учета выветривания при выборе модели трения нефти о воду, пропорциональной квадрату разности локальных скоростей воды и нефти ( $p = 2$ ), определится как

$$\bar{H}(x) \approx \frac{(Q/U)^{\frac{3}{5}}}{1.68[\rho_{oil}g'/\beta]^{\frac{1}{5}}t^{\frac{2}{5}}}, \quad (9)$$

где  $x = Ut$ .

Расчет по соотношению (9) при интенсивности истечения в  $5 \text{ м}^3/\text{ч}$  и скорости течения  $20 \text{ см/с}$  дает оценку для толщины периферийной части разлива порядка  $30 \text{ мкм}$  через  $72 \text{ ч}$  и  $20 \text{ мкм}$  примерно через  $200 \text{ ч}$  после начала сброса. Дальнейшее изменение толщины слоя нефти на поверхности будет обусловлено, кроме непрекращающегося растекания, несколькими процессами — испарением легких фракций в атмосферу и диспергированием капель нефти в водную толщу за счет обрушения ветровых волн. Роль испарения можно учесть, полагая, что все легколетучие компоненты сырой нефти с температурами кипения фракций до  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  (как правило,  $30\text{--}40 \%$ ) испаряются в течение первых суток после аварии. Грубую оценку выветривания можно сделать, воспользовавшись результатами работы [9], в которой изменение толщины пленки нефти за счет диспергирования оценено как

$$\frac{\partial h_{oil}}{\partial t} = \begin{cases} -h_{oil} \cdot TOR \cdot F_{up}(d_{50}^N), & h_{oil} \geq h_T \\ -h_T \cdot TOR, & h_{oil} < h_T \end{cases}, \quad (10)$$

где  $h_{oil}$  — толщина пленки нефти,  $h_T$  — пороговая толщина нефти на поверхности моря,  $d_{50}^N$  — параметр распределения капель диспергированной нефти по размерам, зависящий от плотности и вязкости нефтяного остатка на поверхности моря и межфазного натяжения на границе нефть–вода,  $TOR$  — скорость оборачивания поверхности моря (*turnover rate*, впервые определенная в [10]),  $F_{up}(d_{50}^N)$  — множитель, необходимый для учета доли капель нефти, уходящих в слой волнового перемешивания и далее, в более глубокие слои моря.

$$TOR = \int c\Lambda(c)dc \approx K_{TOR}u_*^3gc_T^{-4} \approx 1,1 \cdot 10^{-7}W_{10}^3, \quad (11)$$

где  $\Lambda(c)dc$  — длина обрушивающихся фронтов волн на единице поверхности моря, движущихся с фазовой скоростью от  $c$  до  $c + dc$ ,  $c_T$  — пороговая фазовая скорость волн, при которой начинается обрушение ( $c_T = 2,5 \text{ м/с}$ ),  $u_*$  — динамическая скорость в приводном слое атмосферы, коэффициент  $K_{TOR} \approx 1,4 \cdot 10^{-2}$ ,  $W_{10}$  — скорость ветра над нефтяным пятном.

Для тонких пленок нефти корректирующий множитель в (10) стремится к единице, и из (10) следует, что тонкая нефтяная пленка за счет диспергирования ветровыми волнами может уменьшаться почти в три раза ( $\sim 2,7$ ) за время порядка  $1/TOR$ . А пленки нефти с толщиной  $h_{oil} < h_T$  в соответствии с соотношением (10) удаляются с поверхности моря за время порядка  $1/TOR$ . Для скорости ветра в  $6 \text{ м/с}$ ,  $7 \text{ м/с}$  и  $10 \text{ м/с}$  промежутки времени  $1/TOR$  приблизительно равны  $12$ ,  $8$  и  $3 \text{ ч}$  соответственно. Рассмотрим некоторые статистические характеристики ветровых условий для залива Чихачева в Японском море (нефтяной терминал Де Кастри) на примере 10-летнего ряда метеорологического реанализа. По многолетнему ряду значений скоростей ветра для одной или нескольких точек на акватории, рассчитанных в метеорологическом реанализе, можно определить вероятность того, что на различных интервалах наблюдений (от суток до двух месяцев) скорость

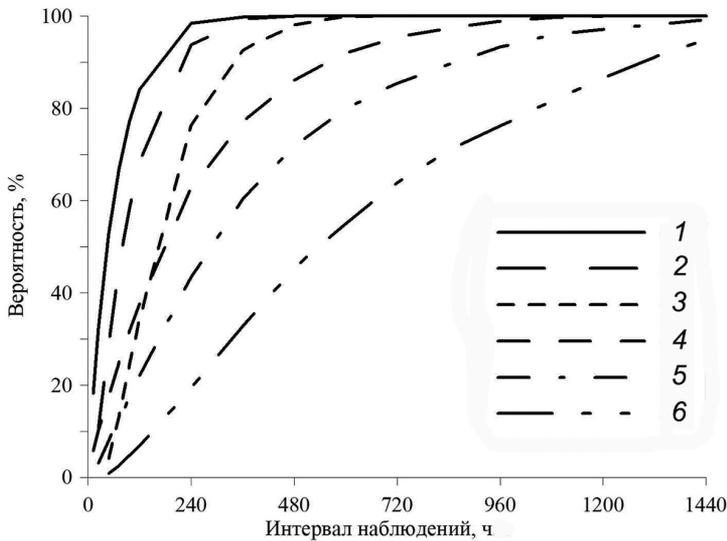


Рис. 2. Вероятность превышения скорости ветра 7 и 10 м/с в течение 12, 24 и 48 ч в зависимости от интервала наблюдений.

1 — скорость ветра равна 7 м/с, промежуток времени превышения — 12 часов; 2 — 7 м/с и 24 ч; 3 — 7 м/с и 48 ч; 4 — 10 м/с и 12 ч; 5 — 10 м/с и 24 ч; 6 — 10 м/с и 48 ч

Fig. 2. The probability of exceeding the wind speed 7 and 10 m/s during 12, 24 and 48 hours depending on the observation interval.

1 — wind speed 7 m/s, time interval of exceeding — 12 hours; 2 — 7 m/s and 24 hours; 3 — 7 m/s and 48 hours; 4 — 10 m/s and 12 hours; 5 — 10 m/s and 24 hours; 6 — 10 m/s and 48 hours

ветра будет превышать определенные значения (7 м/с, 10 м/с) в течение заданного промежутка времени (12, 24 или 48 ч), необходимого для удаления пленки нефти с поверхности за счет диспергирования ветровыми волнами.

На рис. 2 показаны результаты обработки 10-летнего ряда ежечасных значений скорости ветра над морем, цифрами обозначены различные варианты расчетов вероятности. Из рис. 2 можно сделать вывод, что в течение любого непрерывного интервала наблюдений длительностью, например, 10 суток (240 ч) скорость ветра более 7 м/с суммарной продолжительностью 12 ч и более будет реализовываться с вероятностью практически 100 %, продолжительностью 24 ч и более — порядка 95 %, продолжительностью более 48 часов — 76 %.

Выберем значение пороговой вероятности, равное 0,99, и определим длительность интервала наблюдений, обеспечивающего превышение этого значения при выбранных скоростях ветра и интервалах суммарного времени превышения. Полученные результаты приведены в таблице. Из результатов, приведенных в таблице, например, следует, что при скорости ветра, превышающей 6 м/с, толщина пленки нефти на поверхности моря уменьшится в  $10(T_{10})$  раз за 27 ч, а в 20 раз за 35 ч. Такие условия (см. таблицу) для Татарского пролива Охотского моря в летний период реализуются с вероятностью 99 % за периоды наблюдений порядка 264 и 324 ч.

Приведенные данные позволяют оценить «время существования» элементарного разлива нефти. Если считать, что элементарный разлив прекращает существование при толщине пленки в 1 мкм, то, например, периферийная часть разлива

**Длительность интервалов наблюдений (ч), обеспечивающих с вероятностью 0,99  
длительность суммарного превышения для выделенных значений скорости ветра**

Скорость ветра, м/с	1/TOR, ч	Длительность промежутка превышения, ч										Время для уменьшения толщины нефти, ч		
		3	6	8	11	15	18	24	27	36	$T_2$	$T_{10}$	$T_{20}$	
6	12	168	180	192	216	228	240	264	276	324	8	27	35	
7	7	216	228	252	264	276	312	348	372	444	5	17	22	
8	5	252	276	300	336	372	444	516	552	636	3	11	15	
9	3	372	480	504	624	660	660	744	816	912	2	8	10	
10	3	660	816	924	960	1032	1140	1428	—	—	2	6	8	

Примечание:  $T_2$ ,  $T_{10}$ ,  $T_{20}$  — оценки времени уменьшения толщины пятна нефти на поверхности моря за счет процессов диспергирования.

с интенсивностью истечения  $1 \text{ м}^3/\text{ч}$  растекается до  $14 \text{ мкм}$  за  $45 \text{ ч}$ , а испарение за сутки уменьшает толщину на  $30 \%$  до  $10 \text{ мкм}$ . Если принять  $h_T = 10 \text{ мкм}$  в соотношении (10), то для диспергирования оставшейся нефти потребуется еще  $12 \text{ ч}$ . Это соответствует длительности интервала наблюдений приблизительно  $216 \text{ ч}$ , суммарно — около  $260 \text{ ч}$  или  $10\text{--}11$  суток, рассчитанная длительность — оценка сверху.

Вышеприведенные рассуждения следует рассматривать как оценки, поскольку часть капель возвращается к поверхности моря за счет положительной плавучести. В любом случае, есть основания полагать, что объем быстро растекающейся в первые часы после сброса на морскую поверхность нефти будет постоянно уменьшаться, причем скорость испарения будет падать вследствие потери компонентов с низкими температурами кипения, а скорость диспергирования может увеличиваться из-за уменьшения толщины пленки нефти и увеличения плотности ее остатка на поверхности моря<sup>3</sup>.

Для рассматриваемого района были проведены расчеты распространения и выветривания элементарного разлива (ЭР) нефти, оценка площади которого была получена с учетом соотношения (7) для интенсивности истечения  $Q = 1 \text{ м}^3/\text{ч}$ . В расчетах учитывались процессы растекания, диспергирования и испарения нефти для того же набора ветровых условий, который исследовался выше. Была оценена статистика «времени жизни» ЭР — промежутка времени от начала разлива до момента уменьшения толщины менее  $1 \text{ мкм}$ . Эмпирическая функция распределения времени жизни ЭР для представительного ансамбля сценариев распространения нефти по 10-летнему ряду полей ветра, полученных в результате метеорологического реанализа для района залива Чихачева Японского моря, приведена на рис. 3. Виден рост почти линейного характера в пределах семи суток, далее имеется «хвост» с малым количеством случаев в области  $79 \text{ сут}$ . Максимальное значение «времени жизни» для разливов с интенсивностью истечения нефти  $1 \text{ м}^3/\text{ч}$  оказалось равным  $9,3 \text{ сут}$ , а с вероятностью  $99 \%$  толщина нефти на поверхности моря у периферийных частей разлива уменьшается до  $1 \text{ мкм}$  за  $8 \text{ сут}$ .

Концепция «времени жизни» для разлива нефти фиксированного объема меняет представление об оценках максимальной площади пятна, так как эти оценки, с одной стороны, зависят от ветровых условий и, с другой стороны, имеют ограниченную длительность.

<sup>3</sup> Подобные рассуждения справедливы для нефти и нефтепродуктов, не склонных к образованию стабильных эмульсий типа вода-в-нефти на поверхности моря.

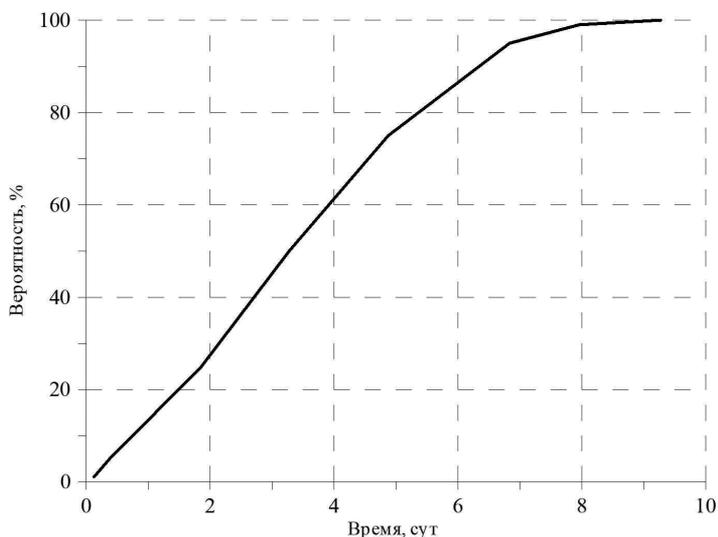


Рис. 3. Эмпирическая функция распределения «времени жизни» ЭР для условий в заливе Чихачева Японского моря

Fig. 3. The empirical distribution function of the “lifetime” of the ES for conditions in the Chikhachev Bay of the Japan Sea

В качестве другого примера ограниченности пространственно-временной эволюции продолжительного разлива нефти приведем результаты расчетов с использованием модели SPILLMOD. На рис. 4 представлены расчеты распространения нефти по поверхности моря (на открытой воде) для постоянно действующего источника выброса нефти на шельфе Охотского моря, примыкающего к северо-восточной оконечности о. Сахалин. Результаты были получены с использованием модели SPILLMOD, в которой распределение толщины и конфигурация нефтяного пятна рассчитываются по уравнениям типа «мелкой воды» с применением оригинальной эйлерово-лагранжевой вычислительной технологии [11]. Важным для данного исследования является тот факт, что в модели SPILLMOD не используется представление разлива в виде совокупности спиллетов или лагранжевых элементов. Конфигурации пятна нефтяного загрязнения через 5, 10, 20 и 30 сут. (см. рис. 4) после начала сброса дают основания для утверждения, что для рассматриваемой интенсивности<sup>4</sup> поступления нефти на поверхность моря спустя 20 сут. распространения от источника протяженность и площадь нефтяного пятна стабилизируются и меняются/колеблются вокруг некоторого среднего значения, зависящего от свойств нефти и гидрометеорологических условий в регионе интереса. Спустя месяц и более после начала аварии аэрокосмический мониторинг поверхности моря будет фиксировать шлейф нефтяного загрязнения, «привязанный» одним концом к точке сброса и простирающийся на открытой воде в пределах нескольких десятков и сотен километров от источника выброса. В некоторые моменты времени нефтяное пятно

<sup>4</sup> В контексте данной методической работы конкретная интенсивность истечения нефти не столь важна. Для каждого участка шельфовой зоны морей РФ возможные дебиты неконтролируемого истечения из скважины должны определяться специалистами по разведке и добыче нефти.

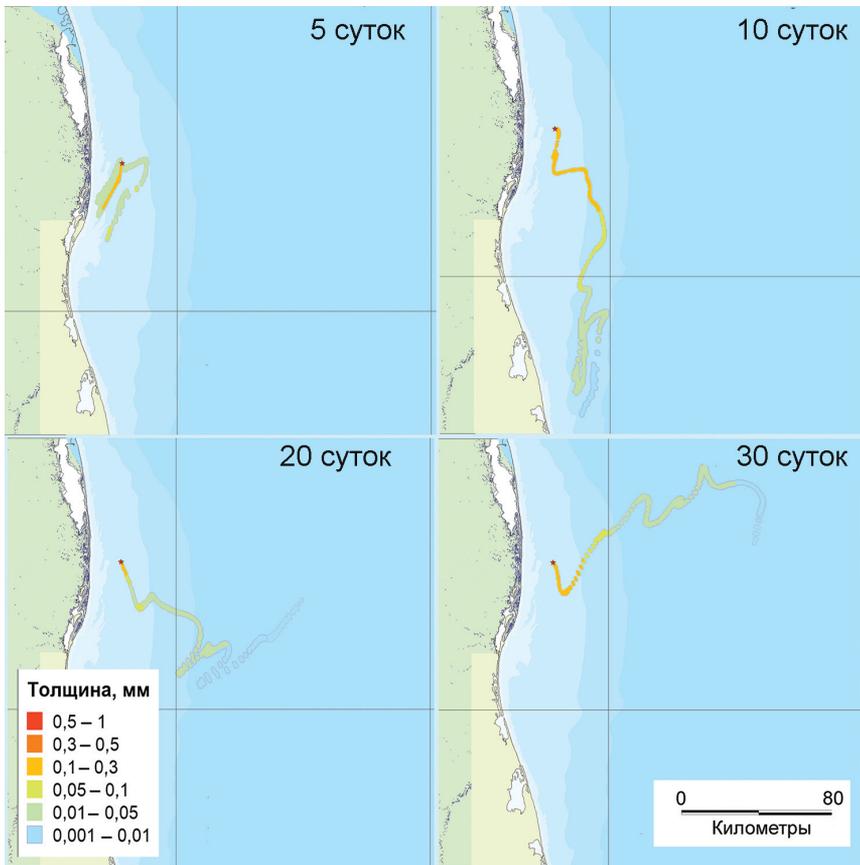


Рис. 4. Примеры расчета распространения нефти от постоянно действующего источника

Fig. 4. Simulation examples of the distribution of oil slick from the continuous source

(шлейф) будет приближаться к берегу и приводить к интенсивному осаждению нефти в береговой зоне, где нефтяное загрязнение может накапливаться. Средняя площадь шлейфа нефтяного загрязнения поверхности моря остается относительно стабильной характеристикой разлива заданной интенсивности, так же, как и соотношения площадей с различной степенью загрязнения. Более интенсивные загрязнения (области с наибольшей толщиной пленки нефти) занимают относительно небольшие доли площади разлива в целом и относятся к участкам акватории, непосредственно примыкающей к источнику.

Результаты, представленные на рис. 4, могут быть получены с использованием технологии моделирования элементарных разливов (ЭР). С этой целью необходимо провести расчеты состояния ЭР на срок порядка «времени жизни», зависящий от интенсивности истечения нефти или нефтепродукта. Пусть, для примера и определенности, время жизни элементарного разлива составляет 30 суток. Для целей нашего исследования достаточно сделать оценку сверху, выбрав для определения «времени жизни» разлива максимально благоприятные метеорологические условия, к которым относятся слабые и умеренные ветра, которые, в свою очередь, не могут быть бесконечной продолжительности и временами сменяются на достаточно сильные

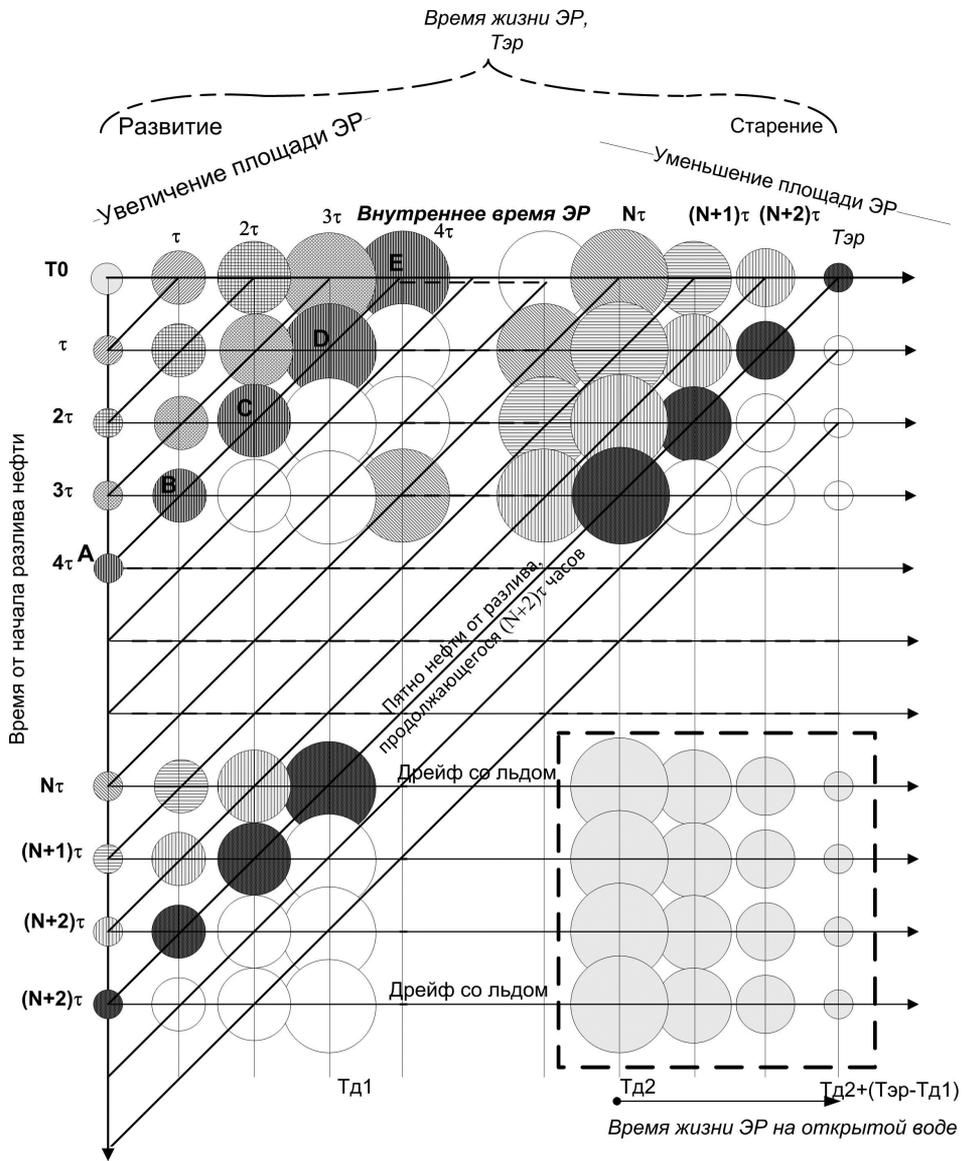


Рис. 5. Схема принципа составления продолжительного разлива из набора элементарных сбросов нефти

Fig. 5. Scheme of the principle of a continuous spill presentation with a set of elementary oil spills ветра, приводящие к диспергированию разлива в водную толщу. Тогда, используя подход, описанный выше, и определяя площадь каждого из ЭР по соотношениям (7), можно выбрать временной шаг  $\tau$  между последовательными ЭР, например, равным 1 ч. Тогда состояние/конфигурация на поверхности моря продолжающегося выброса нефти может быть представлена совокупностью из 720 (30 сут.  $\times$  24 ч) элементарных разливов. При этом «последний» элементарный разлив из всей совокупности будет находиться вблизи источника выброса, а другие, возможно, долго «путешествующие»

по поверхности моря, разрушатся до безопасных концентраций или окажутся на берегу, прожив много меньше 30 суток. Важным в данном методе моделирования является факт конечного времени жизни ЭР, который может быть много меньше продолжительности  $T_B$  выброса нефти. Дополнительным основанием для разбиения продолжительного разлива на элементарные разливы (лагранжевы элементы) является то, что в источнике и на периферии разлива нефть имеет совершенно разные свойства вследствие процессов выветривания.

На рис. 5 показан «конструктор» разливов или принцип составления разлива нефти любой продолжительности по базовым расчетам эволюции элементарных разливов — фрагментов нефтяного пятна на поверхности моря, формирующегося при непрерывном истечении от источника сброса. На рисунке кружками с одинаковой закраской показаны элементарные разливы, из которых, как в конструкторе, можно составить конфигурацию продолжительного выброса нефти на любой момент времени. Диагональные линии соединяют элементарные разливы, относящиеся к одному моменту времени. Так, состояние разлива, начавшегося в момент времени  $T_0$  через промежуток времени  $4\tau$ , можно представить в виде совокупности ЭР-ов, условно обозначенных на рисунке буквами А, В, С, D, Е. В начальные моменты времени площадь каждого ЭР увеличивается, а впоследствии за счет, главным образом, процессов испарения, диспергирования и осаждения на берег масса нефти, сопоставленная рассматриваемому ЭР, уменьшается, вплоть до исчезновения с поверхности моря. При продолжительном истечении нефти из аварийного источника возможны ситуации, когда поднимающаяся к поверхности нефть будет переноситься с ледяным покровом на большие расстояния в течение всего ледового периода вплоть до момента таяния льда. Эти ситуации отмечены на рис. 5 текстовыми вставками «Дрейф со льдом», который, вообще говоря, может продолжаться разное время, а места вытравивания нефти из ледяного покрова будут распределены на значительной площади рассматриваемого водного бассейна.

Расчет движения нефти, вмороженной в ледяной покров, производится на основании данных о движении дрейфующих льдов. Если порция нефти из продолжительного разлива попадает на поверхность моря, покрытую льдом, то на первом шаге рассчитывается перенос льда с вмороженной нефтью до момента таяния, а затем, на втором шаге, трансформация нефтяного пятна на открытой воде за счет выветривания, переноса и растекания. Возможны ситуации, когда часть нефтяного разлива в течение некоторого времени распространяется по открытой воде (1-й шаг) и затем попадает в ледовый « плен ». После этого проводится расчет переноса ледового образования вместе с нефтью до момента таяния (2-й шаг) и затем расчет ее « обычной » трансформации на поверхности моря (3-й шаг). Несмотря на возможную продолжительность моделирования отдельных траекторий перемещения элементарных разливов, достигающую с учетом дрейфа со льдом нескольких месяцев, консервативная оценка воздействия на особо охраняемую природную территорию (ООПТ) предполагает, что, распространяясь вместе с ледовыми полями, нефть сохраняет свойства, сформировавшиеся за счет выветривания к моменту ледового плена.

После вытравивания из ледового покрова, продолжая распространяться на открытой воде, элементарные разливы или части длительного сброса нефти на поверхность моря будут продолжать подвергаться выветриванию под действием гидрометеорологических факторов. В любом случае, эволюция разлива нефти на открытой воде будет складываться из промежутка времени дрейфа по поверхности

моря Тд1 до «вмораживания» в ледяной покров и промежутка времени дрейфа после вытаивания изо льда Тд2, в сумме  $T_{д1} + T_{д2} \approx T_{эр}$  равных «времени жизни» элементарного разлива, характерного для заданной интенсивности истечения нефти.

Запись результатов моделирования в виде матрицы состояний ЭР-ов размерностью  $M \times N$ , где  $M = T_{в}/\tau$  — количество ЭР-ов,  $N = T_{эр}/\tau$ , позволяет провести оценки вероятности потенциального воздействия продолжительного разлива на различные уязвимые объекты в регионе интереса в период открытой воды. Воздействие продолжительного разлива нефти в море на ООПТ можно представить как последовательность воздействий его отдельных частей или элементарных разливов. Состояние элементарного разлива описывается набором параметров, среди которых: положение (координаты), внутреннее время в пределах «времени жизни», формально совпадающее с индексом  $J$  двумерного массива ( $J = 1, N$ ), количество нефти на поверхности и время, прошедшее с момента выброса на поверхность моря, учитывающее продолжительность ледового дрейфа. Поскольку перенос элементарного разлива дрейфующим льдом рассчитывается для точечного объекта, то предполагается, что геометрические размеры элементарного разлива в процессе дрейфа не меняются, а после вытаивания продолжают эволюционировать в соответствии с «правилами» трансформации на открытой воде. Поскольку момент возможной аварии на объектах нефтегазового сектора морской деятельности неизвестен, то оценку воздействия следует рассчитывать в виде вероятности наступления негативных последствий для конкретного района или объекта на акватории с указанием возможного масштаба воздействия. Если  $i, j$ -й элементарный разлив ( $i = 1, M; j = 1, N$ ) попадает в «санитарную» зону ООПТ, то это событие считается неблагоприятным, а количество таких событий, отнесенное к общему количеству рассматриваемых сценариев распространения нефти, представляет оценку вероятности воздействия в случае реализации «запроектной» аварии. Масштаб воздействия «запроектной» аварии, связанной с продолжительным выбросом в море нефти, можно определить как статистику количества нефти, потенциально попадающей в области ООПТ. По отношению к воздействию на побережья, являющиеся частью морских ООПТ, эта количественная оценка воздействия, скорее всего, будет относиться к так называемым консервативным оценкам, так как в рамках массовых расчетов распространения нефти по реконструированным гидрометеорологическим условиям за 10–20–30 лет трудно/невозможно детально рассчитать взаимодействие нефтяного разлива или его части (ЭР) с береговым контуром. Принято считать, что воздействие на береговую зону нефтяной разлив может оказывать только в период открытой воды, а лед выполняет роль искусственных барьеров, аналогично боновым заграждениям [12].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе описана возможность представления продолжительного разлива нефти как совокупности лагранжевых элементов или элементарных разливов с инвариантной, относительно разбиения по времени, оценкой площади разлива в целом.

В работе представлены примеры оценки «времени жизни» продолжающегося нефтяного разлива в условиях открытой воды на основании анализа ветровых условий в районе интереса по многолетним рядам метеорологического реанализа.

В работе описан метод оценки вероятности воздействия на морские ООПТ в результате «запроектных» аварий на объектах нефтегазового комплекса в Арктической зоне. Принимая во внимание, что продолжительность разливов нефти

при авариях в труднодоступных регионах Арктики может быть достаточно большой, превышающей год и более, целесообразно до возникновения чрезвычайной ситуации провести оценки вероятности воздействия на уязвимые объекты на акватории и побережьях с учетом переноса нефти ледовыми полями на большие расстояния, вплоть до момента таяния льда. Область воздействия разливов нефти от конкретного источника сброса в результате переноса льдами увеличивается многократно и может достигать сотен и тысяч километров линейного масштаба.

Предложенный в работе алгоритм проведения расчетов и хранения результатов для их последующей обработки представляется весьма экономичным, с очевидной возможностью использования технологий высокопроизводительных параллельных вычислений, так как эволюция каждого из  $M$  элементарных разливов считается независимо. Тем самым при реализации концепции риск-анализа разливов нефти в море [3] сокращаются вычислительные затраты и объемы данных для хранения. Несмотря на кажущуюся катастрофичность сценария масштабного выброса нефти на поверхность моря в арктических регионах, его экологические последствия представляются поддающимися оценке, и, значит, к ним можно заблаговременно подготовиться и эффективно их минимизировать.

Описанный подход к оценке вероятности воздействия от сверхпродолжительных выбросов нефти в море возможен при условии предварительно проведенного реанализа гидрометеорологических полей, включая характеристики ледовых условий, такие, как сплоченность и скорость дрейфа ледяного покрова.

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 18-07-00373 и № 18-07-01001.

**Acknowledgments.** This work has been partly supported by RFBR grants № 18-07-00373 and № 18-07-01001.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Reed M., Johansen O., Brandvik P.J., Daling P., Lewis A., Fiocco R., Mackay D., Prentki R. Oil spill modeling towards the close of the 20th century: overview of the state-of-the-art // Spill Science Technology Bulletin. 1999. № 5. P. 3–16.
2. Stolzenbach K.D., Madsen O.S., Adams E.E., Pollack A.M., Cooper C.K. A review and evaluation of basic techniques for predicting the behavior of surface oil slicks // Massachusetts Institute of Technology. 1977. Report № MITSG 77-8. 325 p.
3. Зацепя С.Н., Ивченко А.А., Журавель В.И., Солбаков В.В., Становой В.В. Анализ риска распространения аварийных разливов нефти на примере Обской губы Карского моря // Арктика: экология и экономика. 2014. № 3 (15). С. 30–45.
4. Audunson T. The fate and weathering of surface oil from the Bravo blowout // Marine Environmental Res. 1980. V. 3. № 1. P. 35–61.

#### REFERENCES

1. Reed M., Johansen O., Brandvik P.J., Daling P., Lewis A., Fiocco R., Mackay D., Prentki R. Oil spill modeling towards the close of the 20th century: overview of the state-of-the-art. Spill Science Technology Bulletin. 1999, 5: 3–16.
2. Stolzenbach K.D., Madsen O.S., Adams E.E., Pollack A.M., Cooper C.K. A review and evaluation of basic techniques for predicting the behavior of surface oil slicks. Massachusetts Institute of Technology. 1977. Report MITSG 77-8: 325 p.
3. Zatsepa S.N., Ivchenko A.A., Zhuravel' V.I., Solbakov V.V., Stanovoy V.V. Risk analysis of oil spill spread: Case of the Ob Bay of the Kara Sea. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. Arctic: ecology and economic. 2014, 3 (15): 30–45. [In Russian].
4. Audunson T. The fate and weathering of surface oil from the Bravo blowout. Marine Environmental Res. 1980, 3, 1: 35–61.

5. *Fay J. A.* Physical processes in the spread of oil on a water surface // International Oil Spill Conference. American Petroleum Institute, 1971. V. 1971. № 1. P. 463–467.
6. *Fay, J.A., Hoult, D.P.* Physical processes in the spread of oil on a water surface. AD-726 281. United States Coast Guard, Washington DC, 1971. 16 p.
7. *Двайт Г.Б.* Таблицы интегралов и другие математические формулы. М.: Наука, 1978. 224 с.
8. *Зацева С.Н., Ивченко А.А., Солбаков В.В., Становой В.В.* О некоторых инженерных оценках параметров нефтяного разлива в море // Проблемы Арктики и Антарктики. 2018. Т. 64. № 2. С. 208–221.
9. *Зацева С.Н., Ивченко А.А., Коротенко К.А., Солбаков В.В., Становой В.В.* Феноменологическая модель диспергирования нефтяного разлива в море и параметризации некоторых процессов // Океанология. 2018. Т. 58. № 6. С. 843–853.
10. *Phillips O.M.* Spectral and statistical properties of the equilibrium range in wind-generated gravity waves // J. Fluid Mech. 1985. V. 156. P. 505–531.
11. *Овсиенко С.Н., Зацева С.Н., Ивченко А.А.* Моделирование разливов нефти и оценка риска воздействия на окружающую среду // Тр. ГОИН. 2005. Вып. 209. С. 248–271.
12. *Potter S., Buist I., Trudel K., Dickins D., Owens E.* Spill response in the Arctic offshore (ed. D. Scholz). Shell Exploration and Production Services, 140 p. URL: <https://www.shell.com/content/dam/shell-new/local/country/rus/downloads/pdf/wpc/new-oil/osr-book-rus.pdf> (дата обращения 10.07.2018).
5. *Fay J. A.* Physical processes in the spread of oil on a water surface. International Oil Spill Conference. American Petroleum Institute. 1971. 1971, 1: 463–467.
6. *Fay, J.A., Hoult, D.P.* Physical processes in the spread of oil on a water surface. AD-726 281. United States Coast Guard, Washington, DC, 1971. 16 p.
7. *Dwight H.B.* Tables of integrals and other mathematical data (Russian edition). Moscow: Nauka, 1978: 224 p. [In Russian].
8. *Zatsepa S.N., Ivchenko A.A., Solbakov V.V., Stanovoy V.V.* Some engineering estimations of oil spill parameters in the marine environment. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2018, 64, 2: 208–221. [In Russian].
9. *Zatsepa S.N., Ivchenko A.A., Korotenko K.A., Solbakov V.V., Stanovoy V.V.* Phenomenological model of natural dispersion of a marine oil spill and some associated processes parameterizations. *Okeanologiya*. Oceanology. 2018, 58, 6: 769–777. [English translation].
10. *Phillips O.M.* Spectral and statistical properties of the equilibrium range in wind-generated gravity waves. J. Fluid Mech. 1985, 156: 505–531.
11. *Ovsienko S.N., Zatsepa S.N., Ivchenko A.A.* *Modelirovanie razlivov nefiti i ocenka riska vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredu*. *Trudy Gosudarstvennogo Okeanographicheskogo instituta*. Proc. of SOI. 2005, 209: 248–271. [In Russian].
12. *Potter S., Buist I., Trudel K., Dickins D., Owens E.* Spill response in the Arctic offshore (ed. D. Scholz). Shell Exploration and Production Services: 140 p. Available at: <https://www.shell.com/content/dam/shell-new/local/country/rus/downloads/pdf/wpc/new-oil/osr-book-rus.pdf> (accessed 10.07.2018).