УДК 551.468 Поступила 15 сентября 2014 г.

К ОЦЕНКЕ ОБЛАСТИ ВОЗМОЖНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ НЕФТЯНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АВАРИЙНЫХ РАЗЛИВОВ НЕФТИ В МОРЕ

канд. физ.-мат. наук С.Н. ЗАЦЕПА[1], ст. науч. сотр. А.А. ИВЧЕНКО[1], аспирант А.М. МОСКВИЧЕВ[1], канд. физ.-мат. наук В.В. СОЛБАКОВ[2,1], ст. науч. сотр. В.В. СТАНОВОЙ[3]

[1] — ФГБУ Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова, г. Москва, e-mail: zatsepa@gmail.com

[2] — ФГБУН Вычислительный центр им. А.А. Дородницына РАН, г. Москва, e-mail: solbakov@ccas.ru

[3] — ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: vstanovoy@yandex.ru

Прогноз распространения нефтяного разлива — это классический пример «прогноза на прогнозе», так для его реализации приходится использовать прогнозы приводного ветра, течений и уровня в океане. Для пользователя важно иметь представление о том, насколько точно на текущий момент возможно определение положения нефтяного пятна и его конфигурации. В литературе встречаются оценки качества прогнозов метеорологических параметров, в частности оценка точности краткосрочных прогнозов сильных ветров, полученных с использованием двух различных моделей, для дальневосточного региона приведена в статье (Вербицкая, Любицкий, Романский, 2012). Региональная модель Гидрометцентра России, исследуемая в цитируемой статье, задает входные условия для метода расчета течений и уровня в Баренцевом море.

Мы сравнили данные наблюдений с 3-часовой дискретностью на ГМС Варандей за 2013 г. из архива, размещенного на сайте http://rp5.ru, и результаты расчетов по методу краткосрочного прогноза уровня моря, скоростей течений и температуры воды в Баренцевом и Белом морях (Попов и др., 2014) с заблаговременностью 24 часа (рис. 1). Для расчетов полей скоростей ветра используются поля приземного давления, рассчитанные по региональной модели (Лосев, 2010). Расхождение в направлении ветра при скоростях более 3 м/с показано на рис. 2.

Сплошными линиями на диаграммах (рис.1) показаны линии линейной регрессии измеренных и рассчитанных компонент ветра. Уравнения линейной регрессии, приведенные на диаграммах (рис. 1*а* и 1*б*), показывают, что в расчетных данных нет значительной систематической погрешности, по крайней мере для района, примыкающего к ГМС Варандей, а диаграмму рассеяния отклонений скорости ветра на рис. 2 приближенно можно считать симметричной.

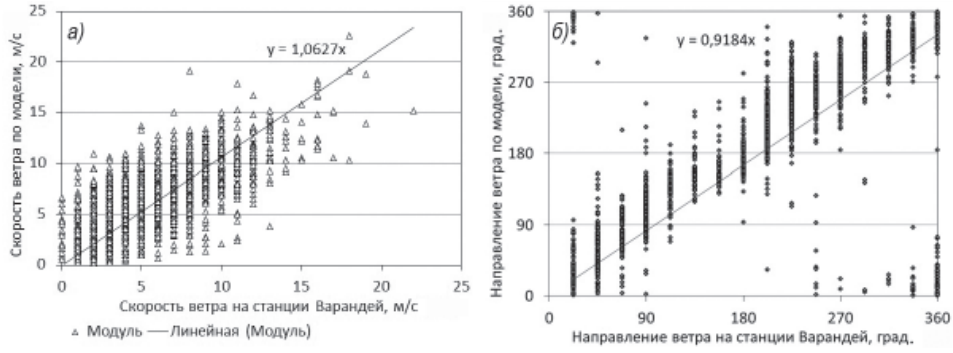

Рис. 1. Корреляция между данными наблюдений и расчета по модели (Попов и др., 2014).

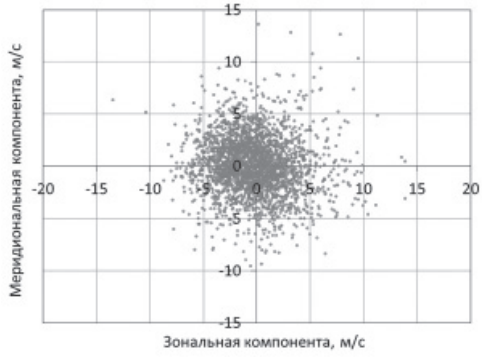

Рис. 2. Диаграмма рассеяния отклонений расчетной скорости ветра от наблюдений.

Статистический анализ временных рядов отклонений скорости ветра от наблюденных значений показал, что распределение ошибки расчета скорости с увеличением длины ряда стремится к приближенно нормальному распределению, где естественно отсутствуют большие значения расхождений между наблюдениями и расчетом. Однако и функция распределения ошибок, и нулевое среднее, и дисперсия не в полной мере характеризуют анализируемую случайную величину.

На рис. 3 приведен фрагмент ряда наблюденных и рассчитанных значений *U*-компоненты (зональной) скорости ветра. В некоторые достаточно длительные промежутки времени наблюденные значения скорости ветра превышают расчетные, но бывает и наоборот.

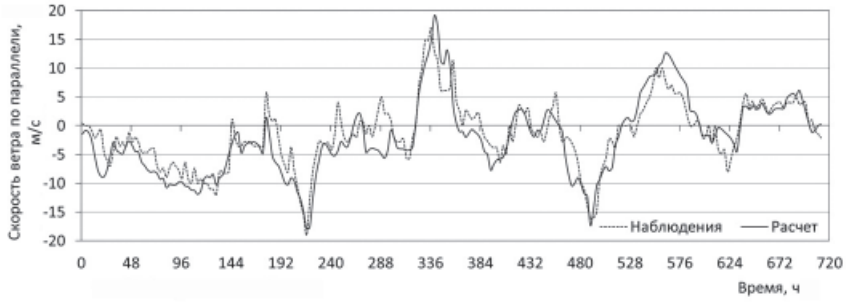

Рис. 3. Наблюденная на станции и рассчитанная по модели скорость ветра.

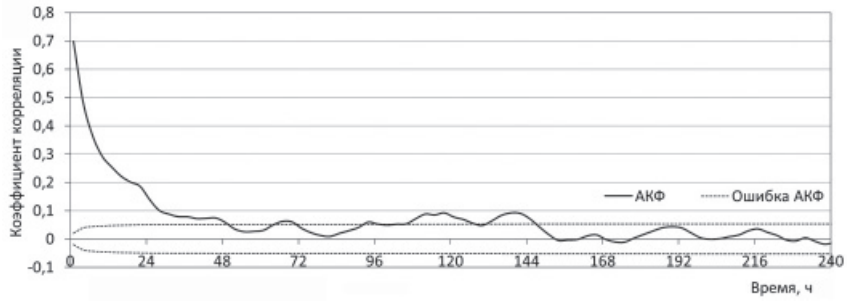

Рис. 4. Автокорреляционная функция для ошибки расчета скорости ветра.

Из графика автокорреляционной функции (АКФ) для погрешности компонент рассчитанной скорости ветра (рис. 4) видно, что промежуток времени τ порядка 50 ч можно считать радиусом корреляции или лагом для рассматриваемого временного ряда.

Показанное на рис. 5 среднеквадратичное отклонение (СКО) результатов расчета от данных наблюдений определилось как

$$\left|\sigma_u\right| = -0,01\left|u_S\right| + 2,9\,, \qquad (1)$$

что можно рассматривать как примерно постоянное значение 2,9 м/с. Отметим, что в работе (Вербицкая, Любицкий, Романский, 2012) были получены значения для СКО скоростей ветра в пределах от 2 до 6,5 м/с в зависимости от используемой модели.

В модели PADM (система SeaTrackWeb) (Liungman, Mattsson, 2011), в которой нефтяной разлив имитируется ансамблем лагранжевых частиц, для того чтобы реализовать идею о неопределенности в имитации переноса, каждой частице присваивалась дополнительная случайная скорость, величина которой зависит от погрешности в оценке прогностической скорости ветра. Случайные «добавки» к скорости движения частицы на поверхности моря определяются соотношением

$$\begin{aligned} u' &= \sigma_{stw} P \cos(2\pi Q) \\ v' &= \sigma_{stw} P \sin(2\pi Q) \end{aligned}, \qquad (2)$$

где P — нормально распределенная случайная величина N (0,1), Q — равномерно распределенная случайная величина на интервале [0, 1]. Параметр σ_{stw} задается как

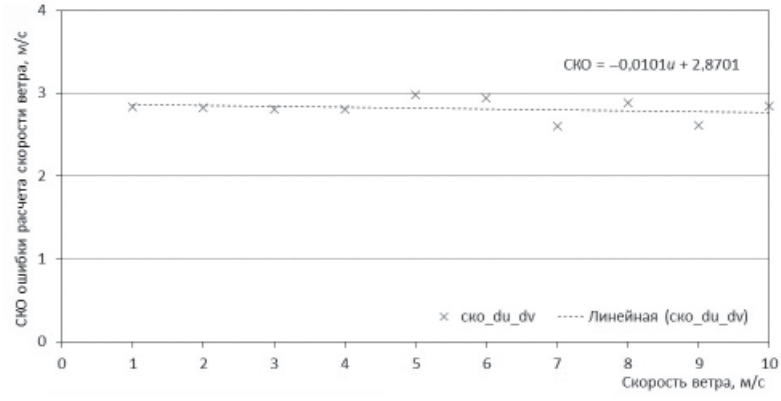

Рис. 5. Зависимость СКО рассчитанной скорости ветра от модуля скорости ветра.

стандартное отклонение ошибки прогноза скорости ветра $\sigma_W = \Delta W/1{,}41$, где ΔW — погрешность в расчете модуля скорости метеорологического прогноза по модели HIRLAM, умноженная на коэффициент $\alpha = 0{,}02$, чтобы привести к скорости индуцированного ветром течения.

Погрешность в расчете модуля скорости, которая покрывает 85 % наблюдаемых значений скорости ветра (Liungman, Mattsson, 2011), определена как:

$$\begin{aligned} &\Delta W = 2 && W \le 2 \text{ м/с}, \\ &\Delta W = 1{,}7 + 0{,}195 \cdot W && W > 2 \text{ м/с}. \end{aligned} \qquad (3)$$

Дополнительные скорости переноса частиц u', v' в (Liungman and Mattsson, 2011) задаются единожды в начале моделирования и сохраняются неизменными для каждой частицы.

В модели (Liungman, Mattsson, 2011) пульсации скорости течения, определенные непосредственно по оценке дисперсии ошибок в определении скорости ветра, приводят к рассеянию частиц R_{un} на поверхности моря за время t после начала аварии в соответствии с соотношением

$$\overline{R_{un}^2} = (t\sigma_{stw})^2 = 4\tilde{K}_L t\,, \qquad (4)$$

что эквивалентно рассеянию в диффузионном процессе с коэффициентом диффузии

$$\tilde{K}_L = \frac{\sigma_{stw}^2 t}{4}\,. \qquad (5)$$

Отметим, что в настоящей работе мы используем термин диффузия (лат. *diffusio* — распространение) лишь как наиболее распространенный термин для рассеивания чего бы то ни было. Искомой величиной является определение вероятного местонахождения разлива нефти и отдельных его частей. По этой причине термин «коэффициент диффузии» мы не идентифицируем с реальными физическими процессами, но используем по аналогии для описания процедуры расчета (квазидиффузии) области возможного обнаружения разлива нефти.

Рассеяние частиц при наличии временной корреляции между скоростями пульсаций рассмотрено в работе (Озмидов, 1986), и средний квадрат отклонения частиц от центра $\overline{R_x(t)^2}$ определен выражением

$$\overline{R_x(t)^2} = 2\overline{\left[\int_0^t u'(\varsigma)d\varsigma\right]^2} = \overline{2(u')^2}\int_0^t (t-\varsigma)R_u(\varsigma)d\varsigma\,, \qquad (6)$$

где $R_u(\varsigma_2 - \varsigma_1) = \overline{u'(\varsigma_1)u'(\varsigma_2)}\,/\,\overline{(u')^2}$ по определению (Озмидов, 1986) — лагранжев коэффициент корреляции, или, в нашем случае, автокорреляционная функция. В выражении (6) сделаны предположения, что $\overline{(u')^2}$ не зависит от координаты и времени, коэффициент корреляции зависит только от разности моментов времени и $R_u(\zeta)$ четная функция.

Коэффициент диффузии в рассматриваемом случае записывается как (Озмидов, 1986):

$$K_L(t) = \overline{(u')^2}\int_0^t R_u(\varsigma)d\varsigma\,. \qquad (7)$$

Интеграл $\int_0^\infty R_u(\varsigma)d\varsigma = T_u$ имеет размерность времени и называется лагранжевым масштабом турбулентности (Озмидов, 1986). В нашем случае этот временной масштаб соответствует промежутку времени, на котором сохраняется коррелятивная связь

между пульсациями скорости, которые мы ассоциируем со случайными ошибками метеорологического прогноза.

При больших временах выражение (6) приближенно равно

$$\overline{R_x(t)^2} \approx 2\overline{(u')^2}T_u t\ , \tag{8}$$

и для коэффициента диффузии при $t >> T_u$ имеем выражение

$$K_L = (\alpha \cdot \sigma_u)^2 T_u\ . \tag{9}$$

При малых временах разложение функции $R_u(\zeta)$ приводит (6) к виду

$$\overline{R_x(t)^2} \approx \overline{(u')^2}t^2 = (\alpha\sigma_u)^2 t^2\ , \tag{10}$$

что соответствует линейному по времени росту коэффициента диффузии

$$K_L(t) = (\alpha \cdot \sigma_u)^2 t\ . \tag{11}$$

Использование общего выражения (6) для оценки неопределенности в положении разлива нефти на поверхности моря представляется трудно реализуемым и практически нецелесообразным. При оценке возможного рассеяния местоположения разлива нефти или его частей следует при временах $t < T_u$ использовать соотношение (11) , а при $t \geq T_u$ — соотношение (9). Таким образом мы получим несколько завышенную оценку рассеяния на временах порядка T_u, что представляется в практических приложениях оправданным в силу очевидного упрощения вычислительной процедуры и, вообще говоря, по причине недостаточности данных для надежного определения $R_u(\zeta)$. С учетом (9) и (11) определим более общее выражение для коэффициента квазидиффузии как

$$K(t) = (\alpha \cdot \sigma_u)^2 T_u \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{T_u}\right)\right). \tag{12}$$

Соотношение (12) при временах $t >> T_u$ удовлетворяет условиям (9), а при $t << T_u$ в результате разложения экспоненты в ряд получим соотношение (11).

Максимальное значение коэффициента «диффузии» для оценки неопределенности в положении разлива нефти на поверхности моря, рассчитанное по соотношению (7) и $R_u(\zeta)$, соответствующему АКФ (см. рис. 4), при больших временах и α = 0,03 оказывается численно равно K_L = 300 м²/с, а значение параметра T_u приближенно равным 11 часам. Изменение условного радиуса области, в которую с вероятностью 63 % «попадает» разлив нефти, при постоянном коэффициенте квазидиффузии описывается соотношением

$$R_{RMS}(t) = 2\sqrt{K_L t}\ . \tag{13}$$

Приведенное в (13) соотношение представляет т.н. RMS (root mean square) оценку «радиуса» области вероятного попадания разлива нефти. Вероятность $P(D)$ попадания случайной точки $((x, y), x = N(0,\sigma), y = N(0, \sigma))$ в круг D с радиусом R равна

$$P(D) = \iint\limits_D f_{x,y}(u,v)dudv = \frac{1}{2\pi}\iint\limits_{u^2+v^2 \leq R^2} e^{-\frac{u^2+v^2}{2\sigma^2}} dudv = 1 - e^{-\frac{R^2}{2\sigma^2}}\ . \tag{14}$$

Из (14) следует, что радиус области с 95 %-ным попаданием определится как $R_{95\,\%} = 1{,}73R_{MS}$.

Используя имеющиеся в нашем распоряжении ряды данных наблюдений на ГМС Варандей за 2013 г. и результаты расчетов по модели (Попов и др., 2014), авторы

провели прямые оценки расхождения траекторий перемещения нефтяных сликов по поверхности моря. Обозначим как dX_k, dY_k разность между координатами нефтяных сликов на k-том шаге, рассчитанных по наблюденному u_{oi} и модельному ветру u_{mi}.

$$dX_k = \sum_{i=1}^{k}(x_{oi} - x_{mi}) = (\alpha\Delta t)\sum_{i=1}^{k}(u_{oi} - u_{mi}),$$
$$dY_k = \sum_{i=1}^{k}(y_{oi} - y_{mi}) = (\alpha\Delta t)\sum_{i=1}^{k}(v_{oi} - v_{mi}). \qquad (15)$$

В эксперименте были рассчитаны 2650 сценариев распространения нефтяных сликов. На рис. 6 приведена эволюция радиуса рассеяния при использовании различных параметризаций коэффициента диффузии. Средний квадрат расхождения траекторий $\left\langle L_k^2 \right\rangle$

$$\overline{L_k^2} = \overline{(dX_k)^2} + \overline{(dY_k)^2} = (\alpha\Delta t)^2\left[\overline{\left(\sum_{i=1}^{k}(u_{oi} - u_{mi})\right)^2} + \overline{\left(\sum_{i=1}^{k}(u_{oi} - u_{mi})\right)^2}\right] \qquad (16)$$

показан на рис. 6 как кривая 4.

Постоянный коэффициент (рис. 6, кривая 1) приводит к наибольшему рассеянию, а соотношения (9) и (11) — к несколько меньшему. Использование выражения (12) для коэффициента — к наименьшему среди вариантов, полученных аналитически на основе анализа автокорреляции. Значения радиуса рассеяния, рассчитанные численно, согласно формулировке для горизонтальной дисперсии (12) оказываются близки. Модель с постоянным коэффициентом (рис. 6, кривая 1) дает значительно большее относительное рассеяние по сравнению с результатами численного моделирования, особенно в течение нескольких первых суток от начала разлива.

Приведенные оценки для радиуса рассеяния справедливы лишь для пространственно-однородных полей течений и ветра и условий открытого моря. Если нефтя-

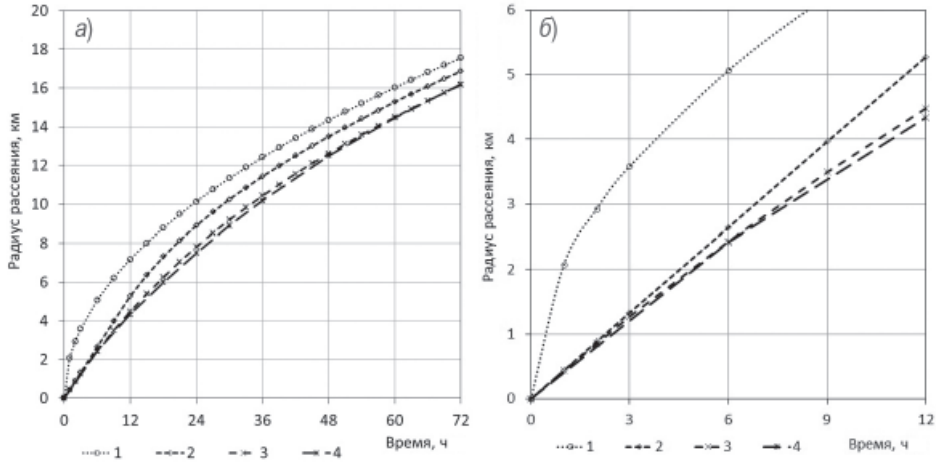

Рис. 6. Оценка радиуса рассеяния при расчете местоположения разлива нефти на поверхности моря в пределах 72 ч (*а*) и 12 ч (*б*): *1* — расчет при постоянном коэффициенте дисперсии (300 м^2/с); *2* — расчет коэффициента дисперсии по формулам (9) и (11); *3* — расчет коэффициента дисперсии по формуле (12); *4* — расчет по формуле (16).

ной разлив «попадает» в искусственные (боны) или природные ловушки (заливы, особенности береговой линии), то данная оценка неправомерна.

Отметим, что приведенные оценки получены для ГМС Варандей и могут быть распространены на акваторию Печорского моря (например, для района платформы Приразломная). Для получения оценок для всей акватории Баренцева моря необходимо провести подобный анализ для других береговых станций.

Описание неопределенности в местоположении пятна нефти на поверхности моря простым радиусом рассеяния недостаточно. Для продолжительных разливов нефти область вероятного обнаружения нефти может иметь довольно сложную геометрию. Погрешность в данных метеорологического прогноза приведет к существенно большим областям рассеяния вблизи берега за счет трансформации течениями и взаимодействия нефтяного пятна с берегом. По этой причине для каждой «порции» нефти, попавшей на морскую поверхность в результате аварии, следует, наряду с традиционным моделированием физико-химической трансформации, рассчитывать рассеяние ансамбля ассоциированных частиц в искусственном диффузионном процессе с коэффициентом диффузии, определенным соотношением (9). В этом случае необходим численный расчет вероятности обнаружения нефтяного слика. Для этого возможно применение следующего алгоритма. После расчета траекторий перемещения частиц, имитирующих квазидиффузионное рассеяние при распространении разлива нефти и определения частоты попаданий в ячейки сетки, определенной по координатам ансамбля частиц, значения частот ранжируются, выбираются ячейки с наибольшими значениями относительных частот, в совокупности составляющих заданный процент попадания в область. Отобранные ячейки оконтуриваются, и полученный контур называется областью обнаружения нефтяного слика с вероятностью.

Ниже рассмотрен сценарий распространения нефти при гипотетической аварии танкера в юго-восточной части Баренцева моря. По сценарию в результате технической аварии 1800 т нефти вытекает на морскую поверхность за 12 часов. В расчете были использованы ветер и течения, рассчитанные по модели (Попов и др., 2014).

На рис. 7 приведено распределение толщины нефти на поверхности моря, а также области с вероятностями обнаружения нефти, равными 97, 80 и 50 %. Наиболее вероятные конфигурации разлива нефти показаны темным контуром, а зоны возможного обнаружения нефти, рассчитанные с учетом погрешности метеорологического прогноза, — светлым контуром со штриховкой. Вектор в геометрическом центре зоны нефтяного загрязнения показывает скорость суммарного течения (приливного и дрейфового), а в дополнительном окошке на рисунке, представляющем копию экрана в системе прогнозирования SPILLMOD, скорость и направление ветра.

На первом из рисунков (рис. 7*а*), через 12 часов после начала сброса нефти разлив нефти еще не «оторвался» от источника. Заметим, что область возможного обнаружения нефтяного пятна формируется не мгновенным ветром, но его историей от начала аварии и до момента времени, на который дается прогноз.

На втором рисунке представлена конфигурация через 36 часов после начала сброса нефти (рис. 7*б*). Наиболее вероятное движение пятна сопровождается выносом нефти на о. Долгий, при этом область возможного обнаружения нефтяного пятна захватывает «затененную» островом от ветра акваторию.

Конфигурация пятна на 48 часов от начала разлива (рис. 7*в*), свидетельствует о том, что при наиболее вероятном выносе разлива нефти на западное побережье

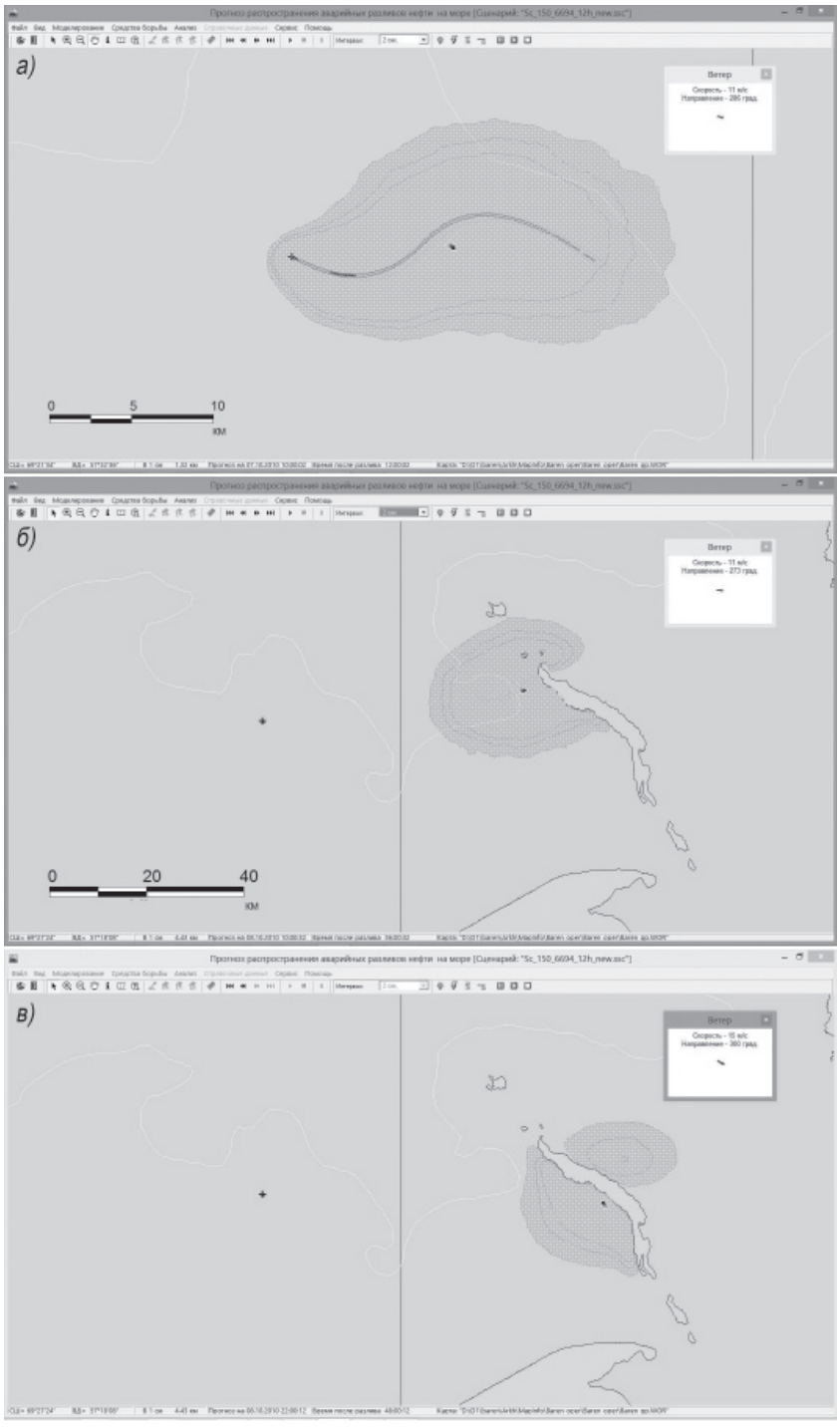

Рис. 7. Расчет распространения разлива нефти с учетом ошибок прогноза ветра: *а* — 12 ч, *б* —36 ч, *в* — 48 ч.

о. Долгий сохраняется вероятность загрязнения акватории в более обширных областях, в том числе и на восточном побережье острова.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При составлении прогнозов распространения нефтяных разливов неизбежно возникают ошибки различной природы. Их источником могут являться неточности в задании исходных данных, среди которых тип и количество нефти на поверхности, время начала сброса и координаты источника, поля приводного ветра, течений и уровня моря и не всегда точные параметризации процессов для всех диапазонов природных условий. Небольшие, на первый взгляд, неточности в задании координат или времени сброса нефти могут приводить к значительным модификациям траекторий распространения разливов. При возможности использования данных аэрокосмического мониторинга для прогнозирования разливов нефти следует вносить корректировки в результаты расчетов.

Для повышения качества прогноза распространения нефтяного разлива в море нужно обращать внимание и сфокусировать усилия на уменьшение погрешности региональных гидрометеорологических прогнозов (ветер, течение и волнение). При оценке прогноза, как правило, используются допустимые диапазоны параметров, при попадании в которые прогноз считается оправдавшимся. Если прогностическая величина дается в виде градации, то это — попадание в соседние градации, если прогностическая величина дается в виде абсолютной величины, то определяются допустимые пределы этой величины. В итоге может возникнуть парадоксальная ситуация, когда прогнозы полей ветра и течения оправдались, а прогноз распространения нефтяного разлива не оправдался и пятно загрязнения неожиданно вышло к берегу или вышло совсем не в том месте, где прогнозировалось.

Здесь же отметим проблему, возникающую при идентификации источника разлива. В литературе и на практике нередки призывы к использованию расчетов траекторий распространения нефтяных разливов для определения потенциальных пересечений двух траекторий — траектории распространения нефти и траектории потенциального источника загрязнения. Методы «обратного счета» должны учитывать погрешности в прогнозах ветра и течений, и, таким образом, можно с некоторой уверенностью говорить о вероятном пересечении траектории движения судов с областью, в которой в заданный момент времени мог находиться источник позже обнаруженного разлива нефти или нефтепродукта.

Авторы выражают признательность сотруднику Гидрометцентра России канд. физ.-мат. наук А.А. Зеленько за полезные замечания при подготовке данной статьи.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Русского географического общества в рамках научных проектов № 13-05-41214 РГО_а, № 14-07-00513 и 14-07-00434.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Вербицкая Е.М., Любицкий Ю.В., Романский С.О. Оценка точности краткосрочного прогноза сильных ветров над акваторией дальневосточных морей, рассчитанного по региональным гидродинамическим моделям // Тр. ДВНИГМИ. 2012. Вып. 154. С. 22–40.

Лосев В.М. Региональная гидродинамическая модель Гидрометцентра России // 80 лет Гидрометцентру России. М.: Триада ЛТД, 2010. С. 36–58.

Озмидов Р.В. Диффузия примеси в океане. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 300 с.

Попов С.К., Зильберштейн О.И., Лобов А.Л., Елисов В.В., Батов В.И. Метод краткосрочного прогноза уровня Баренцева и Белого морей // Инф. сборник № 41 ФГБУ «Гидрометцентр России» «Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов». М.; Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2014. С. 98–110.

Liungman O., Mattsson J. Scientific documentation of Seatrack Web; physical processes, algorithms and references. 1 March 2011. URL: http://www.smhi.se/polopoly_fs/1.15600!Seatrack Web Scientific Documentation.pdf (дата обращения 29.07.2014).