

Динь Нгок Хуи, Нгуен Куок Чинь

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НЕФТЯНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ ЮЖНО-КИТАЙСКОГО МОРЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Dinh Ngoc Huy, Nguyen Quoc Trinh

FEATURES OF OIL POLLUTION SPREADING IN THE COASTAL PART OF THE SOUTH CHINA SEA BY MODEL RESULTS

С помощью математического моделирования исследуются особенности распространения и трансформации нефти от точечного источника в окрестности береговой черты Вьетнама в Южно-Китайском море. Показано, что при южном и северо-восточном ветрах нефтяное загрязнение достигает прибрежной зоны в течение 12 часов и захватывает значительную часть прибрежной зоны. Концентрация содержания нефти у берега достигает величины, незначительно превышающей $2 \cdot 10^{-2} \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$. При восточном ветре нефтяное пятно достигает береговую черту быстрее и характеризуется большим содержанием нефти ($10^{-1} \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$). Однако, область береговой черты, захватываемая нефтяным загрязнением значительно меньше, чем в предыдущих случаях.

Ключевые слова: Нефтяное загрязнение, моделирование, Южно-Китайское море, береговая черта. Вьетнам.

The features of the oil pollution propagation and transformation from a point source in a coastal area of Vietnam in the South China Sea is studied by mathematical modeling. It is shown that for the southern and north-eastern winds the oil pollution reaches the coastal zone in 12 hours and captures much of the coastal zone. However, the concentration of oil in the oil spill is close to $2 \cdot 10^{-2} \text{ gm}^{-3}$. For the east wind, the oil slick reaches the coastline faster and is characterized by high content of oil (10^{-1} gm^{-3}). The area of the coastline captured by the oil pollution is much less than in the previous cases.

Key words: Oil pollution, modeling, the South China Sea, coast line, Vietnam.

Введение

Вьетнам экспортирует сырую нефть и импортирует бензин морским транспортом. Общий объем транспорта нефти с 1991 г. растет до 19,4 % в год. В 2010 г. общий объем нефти через порты Вьетнама составил 40 млн т. Восточная часть Южно-китайского моря является местом крупномасштабной разведки, разработки и транспортировки нефти. При этом большую опасность представляют аварийные ситуации, которые в больших и меньших масштабах возникают в местах освоения нефтегазовых месторождений. Аварийные ситуации включают разливы нефти, связанные с буровыми работами эксплуатацией скважин, а также аварии на сети нефтепроводов. При авариях выбрасывается от нескольких сот до нескольких тысяч кубических метров нефти, в результате ее концентрация в воде иногда достигает $200\text{--}300 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$. Поступающая в море нефть под влиянием течений может переноситься на значительные расстояния,

загрязняя окружающую территорию и нанося ущерб флоре и фауне [1, 2, 3]. В связи с опасностью аварийных разливов нефти представляет интерес оценить возможные последствия таких аварий. В частности, определить возможное время достижения нефтяным пятном береговой черты, а также возможные максимальные концентрации нефти в прибрежной зоне. Процесс распространения нефти в устьевой зоне и прибрежной части моря зависит от большого числа факторов, связанных как с состоянием водной среды, так и с составом нефти. Поэтому решение поставленной задачи требует комплексного подхода, учитывающего как изменение состояния окружающей среды, так и характеристик нефти. К настоящему времени выделены основные процессы, ответственные за изменение характеристик нефти, а также разработаны описывающие их эмпирические закономерности, позволяющие использовать их в методиках расчетов [3].

Основные уравнения

Моделирование растекания нефти выполнялось с помощью математической модели, разработанной французскими исследователями Reddy G.S. and Brunet M. [4]. В модели выделяются два слоя: поверхностный и подповерхностный. Распределение концентрации содержания нефти по толщине слоев считается однородным. В нижнем слое учитывается уменьшение содержания нефти за счет осаждения. Эволюция нефтяного загрязнения рассчитывается отдельно в каждом из слоев. При этом учитывается обмен нефтепродуктами между слоями и их оседание на дне.

Для расчета концентрации нефти в поверхностном слое используется уравнение:

$$\frac{\partial C_s}{\partial t} + u_s \frac{\partial C_s}{\partial x} + v_s \frac{\partial C_s}{\partial y} = k_l \left(\frac{\partial^2 C_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_s}{\partial y^2} \right) - \alpha(C_s - C_v) - \gamma C_s - C_s(S_d + S_e) + f(x, y, t), \quad (1)$$

где C_s – концентрация нефти на единицу поверхности воды; C_v – концентрация нефти в нижнем слое; u_s и v_s составляющие скорости по x и y ($\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$) в поверхностном слое; K_x и K_y – коэффициенты горизонтальной диффузии нефти по x и y ; α – коэффициент обмена нефтью между слоями; γ – коэффициент, описывающий скорость биохимического разрушения нефти; S_d и S_e – скорости распада и испарения нефти на единицу площади; f – интенсивность поступления нефти из источника.

Уравнение трансформации нефти в подповерхностном слое имеет следующий вид:

$$H_2 \frac{\partial C_v}{\partial t} + H_2 u \frac{\partial C_v}{\partial x} + H_2 v \frac{\partial C_v}{\partial y} = H_2 k_l \left(\frac{\partial^2 C_v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_v}{\partial y^2} \right) + \gamma C_v + \alpha(C_s - C_v) - \beta C_v, \quad (2)$$

Где u и v – составляющие скорости течения по x и y ; β – константа, определяющая скорость осаждения нефти; H_2 – толщина подповерхностного слоя, принимаемая равной 10 м.

До расчета скоростей течений рассчитывается полный поток. Для этого используются осредненные по глубине уравнения движения и неразрывности

$$\frac{\partial M_x}{\partial t} + \frac{M_x}{H} \frac{\partial M_x}{\partial x} + \frac{M_y}{H} \frac{\partial M_x}{\partial y} - fM_y + gH \frac{\partial \eta}{\partial x} - k_t \left(\frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M_x}{\partial y^2} \right) + ru + C_w U_w \sqrt{U_w^2 + V_w^2} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial M_y}{\partial t} + \frac{M_x}{H} \frac{\partial M_y}{\partial x} + \frac{M_y}{H} \frac{\partial M_y}{\partial y} + fM_x + gH \frac{\partial \eta}{\partial y} - k_t \left(\frac{\partial^2 M_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} \right) + rv + C_w V_w \sqrt{U_w^2 + V_w^2} = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial M_x}{\partial x} + \frac{\partial M_y}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0, \quad (5)$$

где M_x, M_y – составляющие полного потока; η – возмущение уровня свободной поверхности моря; t – время; H – глубина; g – ускорение силы тяжести; r – гидравлическая шероховатость; U_w, V_w – составляющие скорости ветра по x и y ; C_w – коэффициент трения ветра; $C_w = 0,51 \cdot 10^{-3} \cdot V_w^{0,46}$.

Составляющие скоростей течений в слоях находятся из соотношений

$$u = \frac{M_x}{H_s}, \quad (6)$$

$$v = \frac{M_y}{H_s}, \quad (7)$$

$$u_s = \alpha_w U_w + \alpha_c u, \quad (8)$$

$$v_s = \alpha_w V_w + \alpha_c v, \quad (9)$$

где $\alpha_w = 0,3$; $\alpha_c = 1,1$.

Начальное распределения концентрации нефти принимается нулевым. На границах для концентрации нефти задается условие равенства нулю производных по нормали к границе. Для расчета распространения нефти в районе исследования используются следующие исходные данные: глубина моря, характеристики ветра и интенсивность источника нефти. Расчетная область, располагалась в пределах от 7° с.ш. до 11° с.ш. и от 105° в.д. до 109° в.д. и включала относящуюся к Вьетнаму прибрежную часть Южно-китайского моря. Выбранная область покрывалась прямоугольной сеткой размером 401×401 узлов с шагом 0,01°×0,01° (около 1100×1100 м).

Результаты моделирования

С помощью представленной модели исследовались особенности процесса формирования и трансформации нефтяного загрязнения в прибрежной зоне в зависимости от направления действующего ветра. Рассматривались случаи с ветром северо-восточного, восточного и южного направлений. Основное внимание уделялось времени возможного достижения нефтяным пятном контура береговой черты, а также изменению размера и формы нефтяного пятна, распределению в пятне концентрации содержания нефти. Источник нефти интенсивностью $8,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$ помещался в прибрежной зоне моря в области расположения маршрутов транспортировки нефти. Время действия источника задавалось равным 24 ч. За внешнюю границу нефтяного пятна принималась изолиния концентрации содержания нефти $2 \cdot 10^{-3} \text{ г м}^{-3}$.

При моделировании эволюции нефтяного загрязнения при северо-восточном ветре со скоростью 6 м с^{-1} получено, что при этом происходит формирование поверхностных и подповерхностных течений с направлением вдоль берега. Формирующееся нефтяное пятно распространяется в направлении ветра. С удалением от источника происходит увеличение ширины пятна (рис. 1).

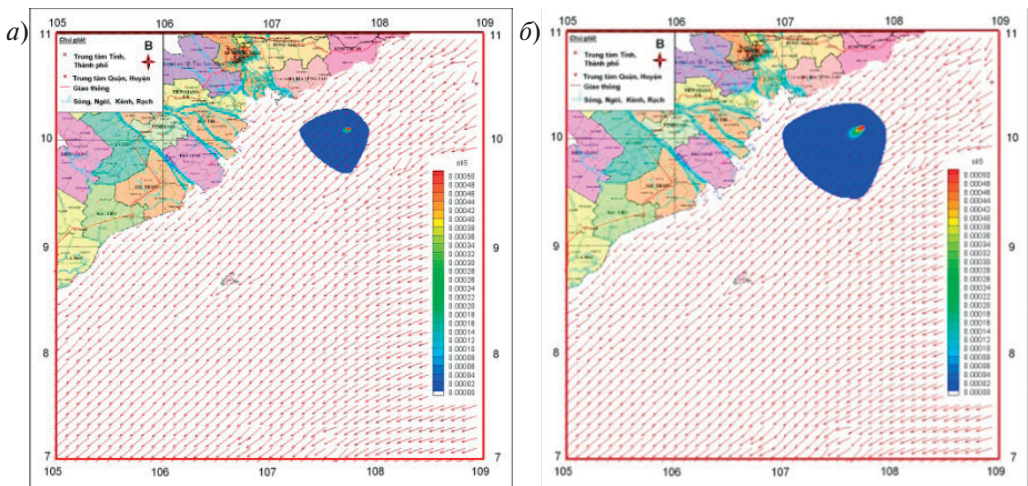


Рис. 1. Распределение концентрации нефти в поверхностном слое через 3 (а) и 6 (б) часов после разлива нефти при северо-восточном ветре.

Через 12 ч пятно достигает берега и начинает влиять на прибрежную территорию провинции Бен Тре (Ben Tre) (рис. 2а). Концентрация содержания нефти в пятне на момент достижения берега меняется в пределах от $2 \cdot 10^{-2}$ до $5 \cdot 10^{-1} \text{ г м}^{-3}$. Максимальная концентрация равная $5 \cdot 10^{-1} \text{ г м}^{-3}$ отмечается в окрестности источника. Через 24 ч пятно распространяется вдоль берега к юго-западу и достигает участка берега провинции Тра Винь (Tra Vinh), а также подходит к острову Кон Дао (Con Dao) (рис. 2б). Концентрация содержания нефти в пятне в этот период меняется в пределах от $2 \cdot 10^{-2}$ до $1,8 \cdot 10^{-1} \text{ г м}^{-3}$.

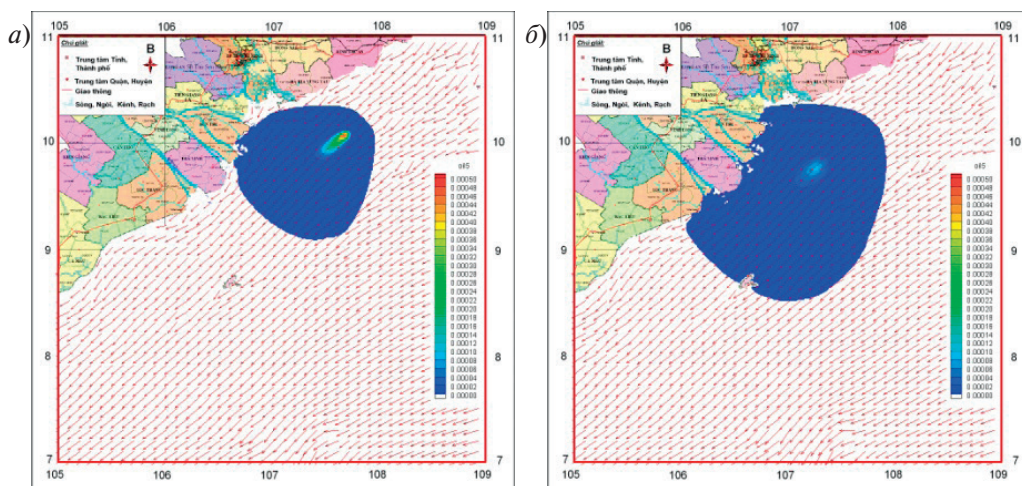


Рис. 2. Распределение концентрации нефти в поверхностном слое через 12 (а) и 24 (б) часа после разлива нефти при северо-западном ветре.

За 48 ч происходит значительное распространение нефти в юго-западном направлении, в результате чего оно захватывает значительную часть береговой зоны (рис. 3а). Из-за прекращения действия источника и процессов разрушения нефти концентрация содержания нефти в пятне уменьшается и лежит в пределах от $2 \cdot 10^{-2}$ до $8 \cdot 10^{-2} \text{ гм}^{-3}$. На момент 60 ч от начала действия источника отмечается некоторое распространение пятна к юго-западу вдоль берега. При этом распределение концентрации содержания нефти в пятне изменяется незначительно.

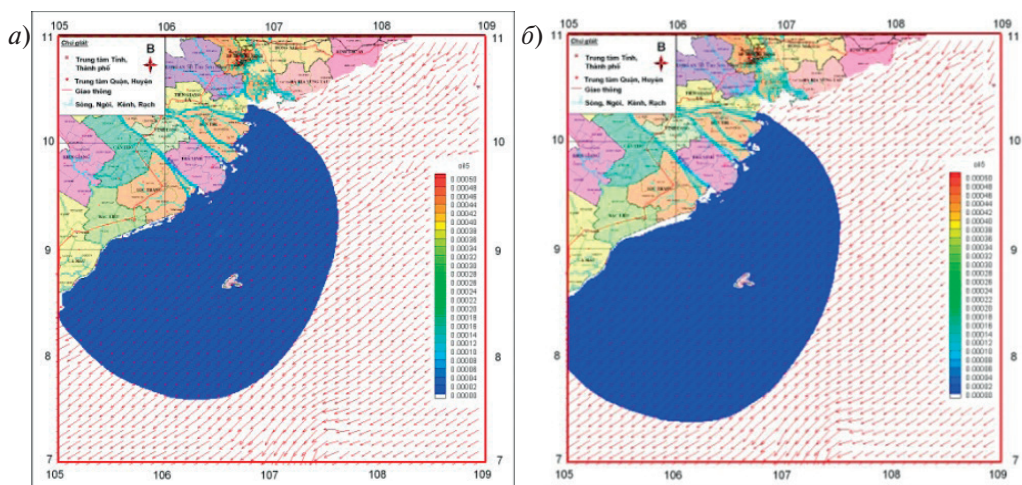


Рис. 3. Распределение концентрации нефти в поверхностном слое через 48 (а) и 60 (б) часов после разлива нефти при северо-восточном ветре.

По результатам расчетов при восточном ветре, направление формирующихся поверхностных течений меняется с расстоянием от берега от западного к северо-западному (рис. 4). Непосредственно у берега на отдельных участках направление течений меняется на юго-западное. В начальный период (до 6 ч) отмечается растекание нефти с преимущественным распространением в северо-западном направлении, что связано с влиянием течений (рис. 4а,б). Через 6 ч пятно достигает берега в районе провинции ВунгТау (Vung Tau). В прибрежной зоне в соответствии с изменением здесь направления течений направление распространения нефтяного загрязнения меняется на западное. Концентрация содержания нефти в пятне на момент достижения берега лежит в пределах от $2 \cdot 10^{-2}$ до $5 \cdot 10^{-1} \text{ гм}^{-3}$.

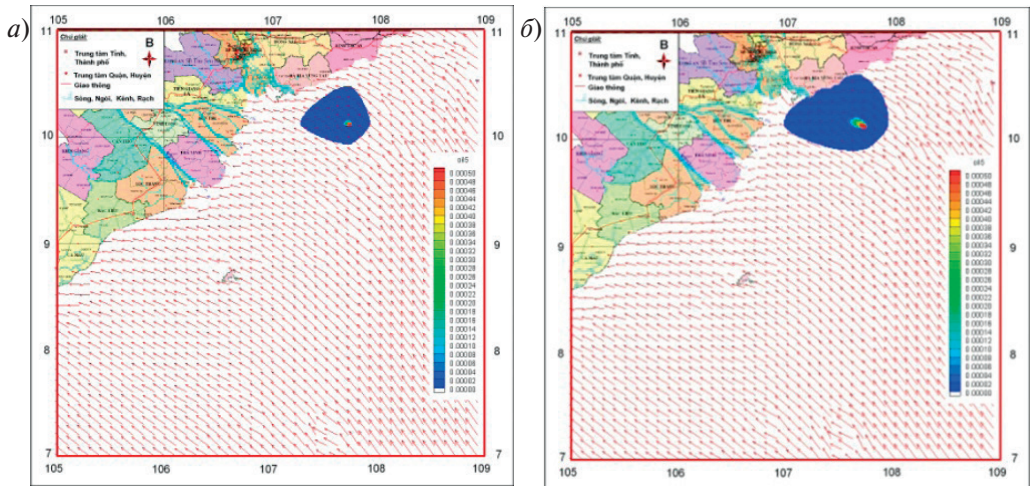


Рис. 4. Распределение концентрации нефти в поверхностном слое через 3 (а) и 6 (б) часов после разлива нефти при восточном ветре.

Через 12 ч пятно распространяется на прибрежные провинции ВунгТау (Vung Tau), Бен Тре (Ben Tre), Тянь Жанг (Tien Giang) и г. Хошимин (Ho Chi Minh city) (рис. 5а). Концентрация содержания нефти в пятне на момент достижения берега меняется в пределах от $2 \cdot 10^{-2}$ до $5 \cdot 10^{-1} \text{ гм}^{-3}$. Через 24 ч происходит расширение пятна вдоль берега в юго-западном направлении, что связано с влиянием отмечающихся вблизи береговой черты юго-западных течений (рис. 5б). Концентрация содержания нефти в пятне меняется в пределах от $2 \cdot 10^{-2}$ до $3 \cdot 10^{-1} \text{ гм}^{-3}$. Максимальная концентрация содержания нефти у берега на этот момент времени составляет $(8-10) \cdot 10^{-2} \text{ гм}^{-3}$.

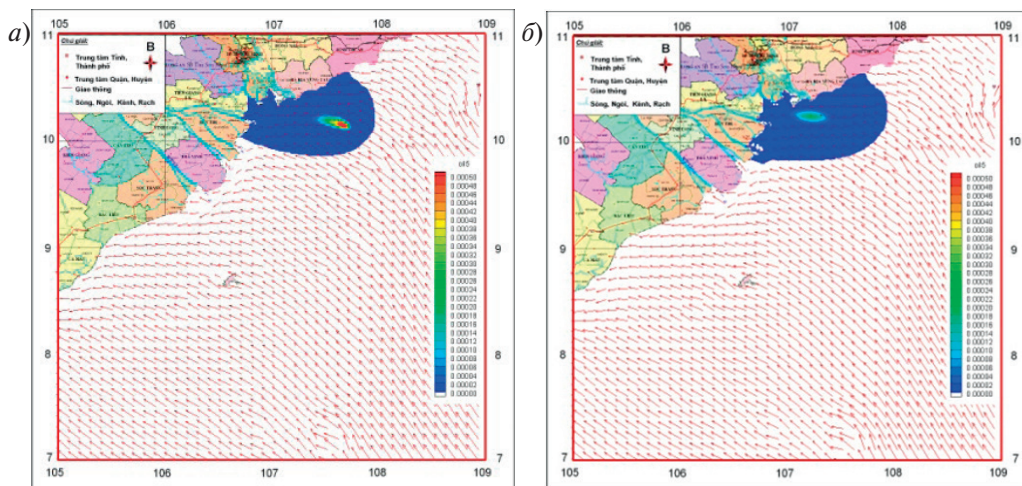


Рис. 5. Распределение концентрации нефти в поверхностном слое через 12 (а) и 24 часа (б) после разлива нефти при восточном ветре.

Через 48 ч пятно захватывает береговую линию провинций ВунТай (Vung Tau), Бен Тре (Ben Tre), Тянь Жанг (Tien Giang), г. Хошимин (Ho Chi Minh city) и распространяется вдоль берега провинции Тра Винь (Tra Vinh) (рис. 6а). Концентрация содержания нефти в пятне изменяется в пределах от $2 \cdot 10^{-2}$ до $6 \cdot 10^{-2}$ гм^{-3} . Далее за 12 ч положение и форма пятна мало изменяются по сравнению к моменту на 48 ч (рис. 6б). Концентрация содержания нефти в пятне уменьшается, а ее распределение становится более однородным.

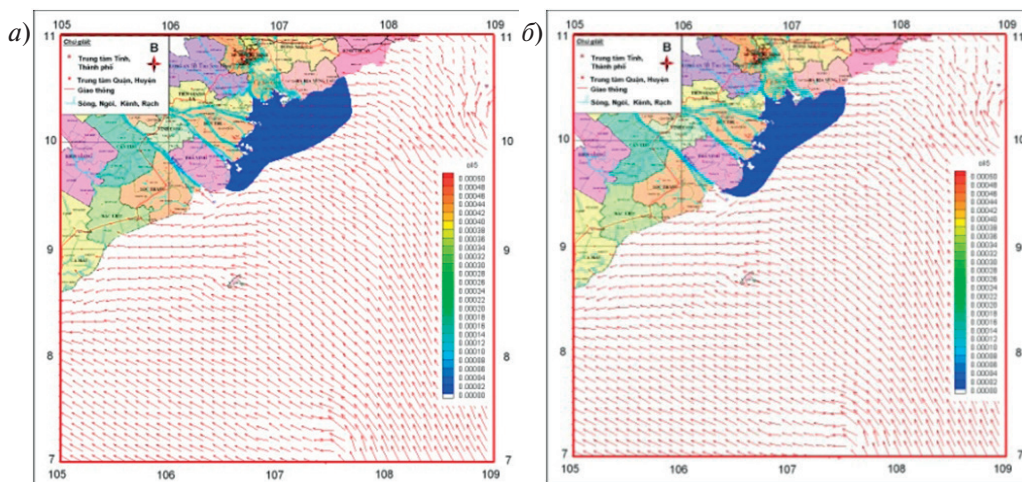


Рис. 6. Распределение концентрации нефти в поверхностном слое через 48 (а) и 60 (б) часов после разлива нефти при восточном ветре.

При юго-восточном ветре течения в окрестности пятна имеют преимущественно северо-западное направление и практически совпадают с направлением ветра. В начальный период (до 3 ч) происходит формирование расширяющегося нефтяного пятна, перемещающегося вдоль направления действия ветра. Через 6 ч пятно уже достигает берега в окрестности провинций ВунгТай (Vung Tau) и Бинь Туан (Binh Thuan) (рис. 7а,б). Концентрация содержания нефти около источника в этот момент достигает величины $5 \cdot 10^{-1} \text{ гм}^{-3}$.

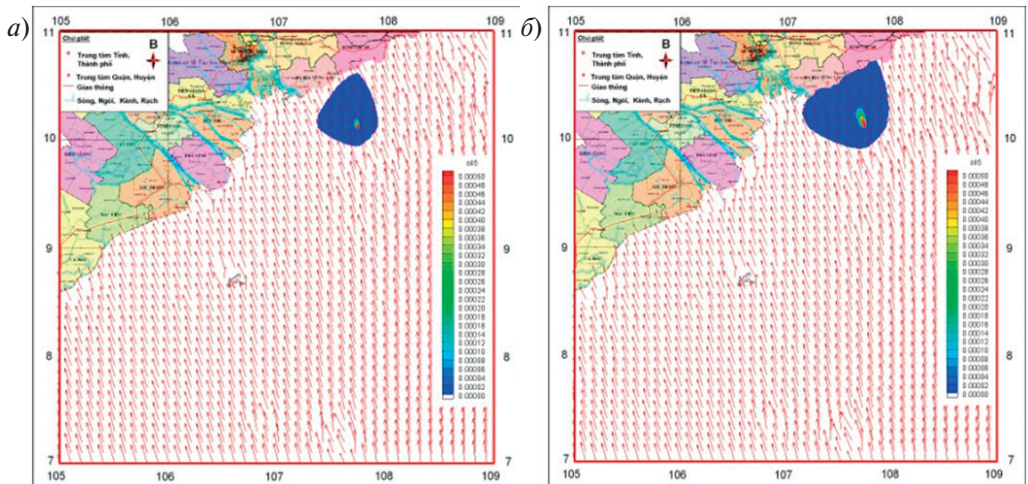


Рис. 7. Распределение концентрации нефти в поверхностном слое через 3 (а) и 6 (б) часов после разлива нефти при юго-западном ветре.

С течением времени ширина пятна у берега возрастает и через 12 ч пятно достигает расположения г. Хошимин (Ho Chi Minh city) (рис. 8а). Концентрация содержания нефти в пятне на момент достижения берега меняется в пределах от $2 \cdot 10^{-2}$ до $5 \cdot 10^{-1} \text{ гм}^{-3}$. Через 24 ч пятно захватывает береговую линию провинций ВунгТай (Vung Tau), Бинь Туан (Binh Thuan), Тянь Жанг (Tien Giang) и г. Хошимин (Ho Chi Minh city) (рис. 8б). Концентрация содержания нефти в пятне меняется в пределах от $2 \cdot 10^{-2}$ до $1,6 \cdot 10^{-1} \text{ гм}^{-3}$.

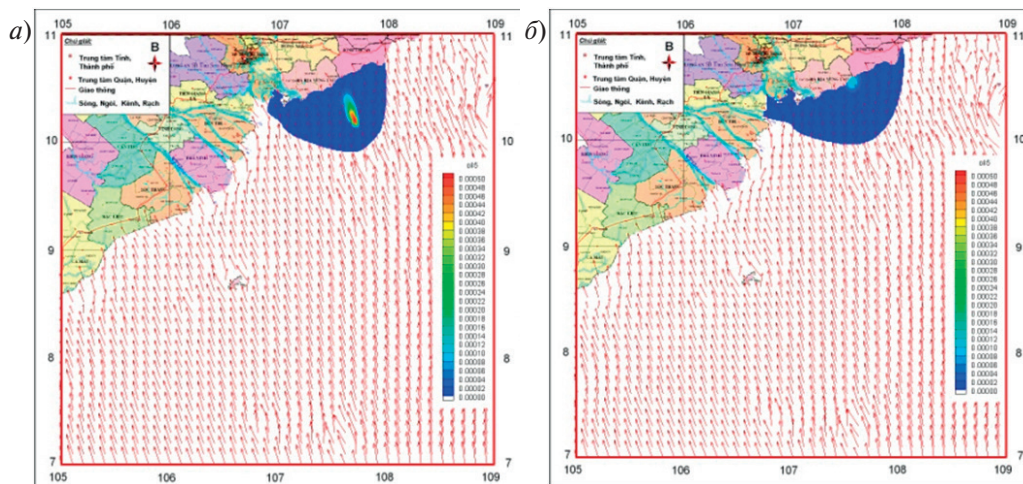


Рис. 8. Распределение концентрации нефти в поверхностном слое через 12 (а) и 24 (б) часов после разлива нефти при юго-восточном ветре.

Через 48 ч пятно под горизонтальной диффузией отмечается некоторое распространение нефти вдоль берега, однако меньшая, чем в предыдущих рассмотренных случаях (рис. 9а). Концентрация содержания нефти в пятне уменьшается и выравнивается. Форма нефтяного пятна и концентрация в нем нефти в следующие 12 ч меняется слабо (рис. 9б). В целом, можно отметить, что при юго-восточном ветре область загрязнения береговых участков наименьшая из рассмотренных случаев.

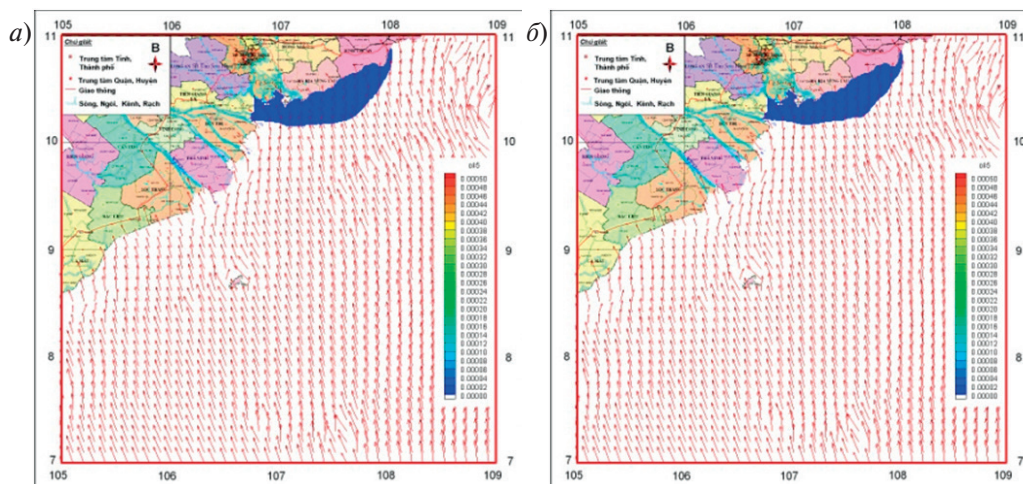


Рис. 9. Распределение концентрации нефти в поверхностном слое через 48 (а) и 60 (б) часов после разлива нефти при юго-восточном ветре.

Заключение

Вьетнамский участок Южно-Китайского моря характеризуется высокой степенью риска загрязнения нефтью и нефтепродуктами, что связано с интенсивными морскими перевозками нефтепродуктов, а также с деятельностью нефтеразведки и нефтедобычи.

Численное моделирование возможного поведения нефтяного загрязнения при различных ветровых условиях показало, при восточном ветре, нефтяное пятно быстрее достигает береговой зоны моря. При этом достигающее берега нефтяное пятно характеризуется наиболее высокими концентрациями нефти. При северо-восточном и юго-восточном ветрах, концентрация нефти в пятне при достижении берега меньше, чем в предыдущем случае, но загрязнение захватывает больший участок берега.

Полученные результаты показали, что используемая модель может быть применена для оценки возможных загрязнений при различных сценариях аварийных разливов нефти.

Литература

1. *Дурягина Е.Г.* Мониторинг нефтеразливов. // Ученые записки РГГМУ, 2010, № 12, с. 110–119.
2. *Мионов А.* Нефть в море : Катастрофа века. // Химия и жизнь, 1992, № 3, с. 34–39.
3. *Царев В.А., Шельтинг С.К.* Методика краткосрочного прогноза последствий аварийного разлива нефти в Азовском море. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь, 2006, вып. 14. – 227 с.
4. *Reddy G.S. and Brunet M.* (2005). Numerical Prediction of Oil Slick Movement in Gabes Estuary. Transoft International, EPINAY/SEINE, Cedex, France.