

## РАЗДЕЛ II. НАУКИ О ЗЕМЛЕ. ЭКОЛОГИЯ

УДК 532.5

*Авербух Е.А.<sup>1</sup>, Тюгин Д.Ю.<sup>1</sup>, Куркин А.А.<sup>1</sup>, Куркина О.Е.<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики"  
(г. Нижний Новгород)

### РЕЖИМЫ ДИНАМИКИ ЗАГРЯЗНЕНИЙ И ПРИМЕСЕЙ В ПОЛЕ ТОПОГРАФИЧЕСКИХ ЗАХВАЧЕННЫХ ВОЛН

*E. Averbukh<sup>1</sup>, D. Tyugin<sup>1</sup>, A. Kurkin<sup>1</sup>, O. Kurkina<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseev

<sup>2</sup>National research university "Higher school of Economics", Nizhny Novgorod

### DYNAMIC REGIMES OF POLLUTION AND CONTAMINATION IN THE FIELD OF TOPOGRAPHICALLY TRAPPED WAVES

*Аннотация.* Проведено моделирование поверхностных проявлений линейных и нелинейно взаимодействующих краевых волн различного модового состава на шельфе моря. Изменение концентрации пленок поверхностно-активных веществ под действием таких волн описывается численными решениями уравнения баланса в рамках модели адвекции, дополненной диффузионными и релаксационными слагаемыми. Представлены различные режимы динамики загрязнений и примесей на поверхности моря, которые могут быть использованы при интерпретации радиолокационных снимков.

*Ключевые слова:* краевые волны, бегущие волны, трехволновые взаимодействия, линейная суперпозиция.

*Abstract.* Surface manifestations of linear and nonlinear interaction of the edge waves of different mode composition are simulated numerically on a sea shelf. Changes in the concentration of films of surfactants, induced by the action of such waves, are described by using the numerical solutions of the balance equations within the framework of the advection–diffusion–relaxation model. Different dynamic regimes of pollution and contamination of the sea surface are presented, which can be used to interpret radar images.

*Key words:* edge waves, traveling waves, three-wave interactions, linear superposition.

В настоящее время органические пленки биогенного и антропогенного происхождения на поверхности моря наблюдаются практически повсеместно. Биогенные пленки – результат жизнедеятельности морских организмов и растений, главным образом фито- и зоопланктона. Поверхностные пленки антропогенного происхождения в основном связаны с разливом нефти и нефтепродуктов и выбросом в море сточных вод [8]. Нефтяные разливы в море возникают вследствие ряда причин, среди которых наиболее распространены сбросы балласт-

ных вод, отработки и льяльных вод, выносы нефтепродуктов со стоком рек, промышленные и канализационные стоки, аварии на хозяйственных объектах, нередко образуются вследствие аварии на танкерах и нефтяных платформах.

Развитие системы нефтепроводов пришлось на 60–70-е гг. Поэтому сегодня более 29 % нефтепроводов России имеют возраст от 20 до 30 лет, а 26 % – свыше 30 лет, и существующая сеть нефтепроводов выработала свой ресурс. Уровень износа превышает 63%. На данном этапе развития на территории Российской Федерации эксплуатируется более 200 тыс. км трубопроводов для перекачки нефтепродуктов и газа, 350 тыс. км промышленных трубопроводов, 800 компрессорных нефтеперекачивающих станций. Аварии судовождения исключить не удастся, несмотря на предпринимаемые меры по повышению технических и экологических требований к обеспечению безопасности судоходств. Основной причиной аварий, в результате которых происходит разлив нефти, являются столкновения, посадки на мель, взрывы и пожары. Например, аварии: английского танкера “Глоуб Асиими” в 1981 г. в порту Клайпеда – разлито около 16 тыс. тонн нефти, американского танкера “Эксон Валдиз” в 1989 г. на Аляске – разлито около 40 тыс. тонн нефти, российского танкера “Находка” в 1997 г. у берегов Японии – разлито около 15 тыс. тонн нефти [20].

Поверхностные пленки антропогенного происхождения переносятся в Мировой океан на большие расстояния от её источников, накапливаются в центрах крупномасштабных круговоротов, а также во фронтальных и эстуарных зонах, создавая поля устойчивого загрязнения, и переносятся в более глубокие слои океана [12]. Они влияют на поверхностные волны, избирательно подавляя коротковолновые компоненты ветрового волнения, в частности уменьшая общую энергию и их дисперсию. На поверхности моря образуется хорошо различимое пятно, выглаженное нефтяной пленкой – слик. Гладкая поверхность отражает падающие на нее электромагнитные волны в сторону от источника излучения. От-

развившись, радиоволны не возвращаются к радиолокатору, и область слик отображается темным тоном на радиолокационном изображении. Более подробно теория воздействия пленок загрязняющих веществ на ветровую рябь в поле волн и течений изложена в работах [ 1; 3–5; 15; 21].

Мониторинг состояния экосистемы морей в рамках подхода, связанного с анализом и расшифровкой данных дистанционного зондирования, является одним из самых эффективных средств борьбы с загрязнением Мирового океана. А задача распознавания и классификации режимов динамики загрязнений и примесей становится актуальной и необходимой. На сегодняшний момент существует ряд работ по классификации загрязнений ряда физических процессов: среди них штилевые зоны, атмосферные и океанические внутренние волны, валообразные вихри, конвективные ячейки, дождь и дождевые ячейки, апвеллинг, морской лед и др. [ 1; 6; 8–10; 13; 16].

Неотъемлемой частью динамики шельфовой зоны являются краевые волны [2; 7; 17] – относительно высокочастотные волны, распространяющиеся вдоль берега, фактически не чувствующие вращения Земли, достигающие максимальной амплитуды на границе с сушей и быстро спадающие с удалением от берега. Вся энергия этих волн сосредоточена в узкой прибрежной зоне и фактически не может передаваться в открытый океан, так что происходит своеобразный “захват” волновой энергии. Краевые волны играют определяющую роль во многих процессах береговой динамики, таких, как перенос осадочного материала, формирование структуры береговой линии и прибрежного рельефа, прибойные биения, и часто рассматриваются как определяющий фактор эволюции береговой линии при формировании ритмических форм рельефа, таких, как серповидные бары и фестоны. Однако поверхностные проявления краевых волн, которые вызывают небольшие смещения морской поверхности, но создают наиболее заметные возмущения именно в поле горизонтальной скорости, еще

не рассматривались в литературе в контексте режимов динамики примесей.

Будем рассматривать динамику пленки ПАВ в поле:

– линейных топографических захваченных (краевых) волн одной моды, распространяющихся над шельфами различной геометрии;

– линейной суперпозиции топографических захваченных (краевых) волн различных мод;

– триад нелинейно взаимодействующих топографических захваченных (краевых) волн различных мод;

– топографических захваченных (краевых) волн в бассейне с переменной вдоль берега топографией,

в рамках уравнения баланса поверхностной концентрации поверхностно-активных веществ  $\Gamma(x, y, t)$  для «двухмерной» пленки [19]:

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial t} + \frac{\partial(u\Gamma)}{\partial x} + \frac{\partial(v\Gamma)}{\partial y} = D\left(\frac{\partial^2 \Gamma}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Gamma}{\partial y^2}\right) + \frac{\Gamma_0 - \Gamma}{\tau} \quad (1),$$

где  $u(x, y, t)$ ,  $v(x, y, t)$  – компоненты двухмерной (поверхностной) заданной скорости гидродинамического потока. Параметр  $D$  есть коэффициент горизонтальной (поверхностной) диффузии, а  $\tau$  – характерное время релаксации пленки, описывающее процессы обмена с более глубокими слоями воды,  $\Gamma_0$  – равновесная концентрация пленки на поверхности раздела (в отсутствие течения). Эта величина может зависеть от многих параметров, например, от скорости ветра над водой, температуры, солености воды и др. Коэффициенты  $D$  и  $\tau$  являются эмпирическими. Они могут меняться в пространстве и во времени и также определяются различными физическими процессами в окрестности поверхности раздела.

В настоящей работе представлены численные решения уравнения (1) для поля течений на поверхности, создаваемого краевыми волнами. При этом компоненты горизонтальной скорости для каждой из гармоник краевых волн записываются в следующем виде [ 2; 7; 17]:

$$u(x, y, t) = \text{Re}\{U(y) \exp i(\omega t - kx)\},$$

$$v(x, y, t) = \text{Re}\{V(y) \exp i(\omega t - kx)\},$$

где:  $U(y)$ ,  $V(y)$  – комплексные функции, описывающие распределение волновых полей по поперечной к берегу координате  $y$  (структура моды),  $\text{Re}$  – знак вещественной части получаемых выражений,  $\omega$  – частота,  $k$  – вдольбереговое волновое число. Компоненты скорости можно записать следующим образом:

$$U = \frac{gk}{\omega} F, \quad V = \frac{ig}{\omega} \frac{dF}{dy}$$

где:  $F(y)$  – структура моды краевой волны, которая находится как решение линейной краевой задачи вида:

$$\frac{d^2 F}{dy^2} + \frac{1}{h} \frac{dh}{dy} \frac{dF}{dy} + \left( \frac{\omega^2}{gh} - k^2 \right) F = 0,$$

здесь  $h(y)$  задает форму профиля рельефа дна на цилиндрическом шельфе. Краевые условия для этой задачи таковы: на берегу ставится условие отсутствия потока массы через береговую границу, на бесконечности структура моды стремится к нулевому значению для захваченных волн. Решением этой задачи является бесконечный дискретный набор мод  $F(k, y)$  и соответствующих им дисперсионных кривых  $\omega(k)$ . Таким образом, поле краевых волн может быть многомодовым.

Начальные условия для уравнения (1) соответствуют постоянному равновесному значению концентрации ПАВ:

$$\Gamma(t = 0) = \Gamma_0 = \text{const}.$$

На границах расчетной области для уравнения (1) ставились условия: непротекания на берегу, периодические – на боковых границах по вдольбереговой координате  $x$ , а мористая граница считалась достаточно далекой, так чтобы волновые возмущения не успевали доходить в эту область за время расчетов, т. е. концентрация там не изменялась и всегда

оставалась равной начальной равновесной, концентрации  $\Gamma_0$ . Метод численного решения уравнения (1) подробно изложен в [11].

Для классификации радиолокационных изображений морской поверхности и распознавания поверхностных проявлений краевых волн на них необходимо проанализировать распределения ПАВ в поле краевых волн в различных условиях. Для демонстрации эффектов диффузии, релаксации, трансформации волнового режима и амплитуды, для расчетов были выбраны несколько модельных случаев поля краевых волн. Приведем здесь типичные распределения концентрации ПАВ для рассматриваемых случаев.

1. Распределение концентрации ПАВ на линии уреза, типичное в рамках модели адвекции для линейной бегущей краевой волны для модели линейно-наклонного шельфа (угол наклона 0.006 [рад]) представлено на рис. 1 для в рамках модели адвекции ( $D = 0$  [м<sup>2</sup>/с],  $\tau = \infty$  [ч]) для линейной бегущей краевой волны ( $k = 0.02$  [м<sup>-1</sup>],  $\omega = 0.08$  [рад/с], 2 мода).

Необходимо отметить, что для этого простейшего случая для всех моделей шельфа распределение пленки вдоль линии уреза качественно аналогично и имеет нестационарную структуру, периодическую во времени и пространстве. Различия в зависимости от выбора геометрии шельфа наблюдаются лишь в уровне изменений концентрации [11].

1.1 Распределение концентрации ПАВ в моменты времени, соответствующие максимуму и минимуму концентрации для модели шельфа – бесконечного откоса (2 мода,  $k = 0.02$  [м<sup>-1</sup>],  $\omega = 0.08$  [рад/с], угол наклона 0.006 [рад]), показано на рис. 2.

1.2. Распределение концентрации ПАВ в моменты времени, соответствующие максимуму и минимуму концентрации для модели шельфа-ступеньки (2 мода,  $k = 0.02$  [м<sup>-1</sup>],  $\omega = 0.08$  [рад/с], высота глубоководной части ступеньки 10 м, мелководной 1м, ширина 536 м), показано на рис. 3.

1.3. Распределение концентрации ПАВ в моменты времени, соответствующие максимуму и минимуму концентрации для вогнутого экспоненциального шельфа (2 мода,  $k = 0.02$  [м<sup>-1</sup>],  $\omega = 0.08$  [рад/с], характерная ширина шельфа 0.007 м, постоянная глубина на бесконечности 1.5 м), показано на рис. 4.

Из рис. 2 – рис. 4 видно, что изменения концентрации ПАВ под воздействием поля течений, индуцированных краевыми волнами, сосредоточены в прибрежной шельфовой зоне и исчезают с удалением от берега. Распределение концентрации характеризуется регулярной структурой «пятен» повышенной и пониженной концентрации, число которых в поперечном к берегу направлении зависит от номера моды краевой волны. Во вдольбереговом направлении на одну длину краевой

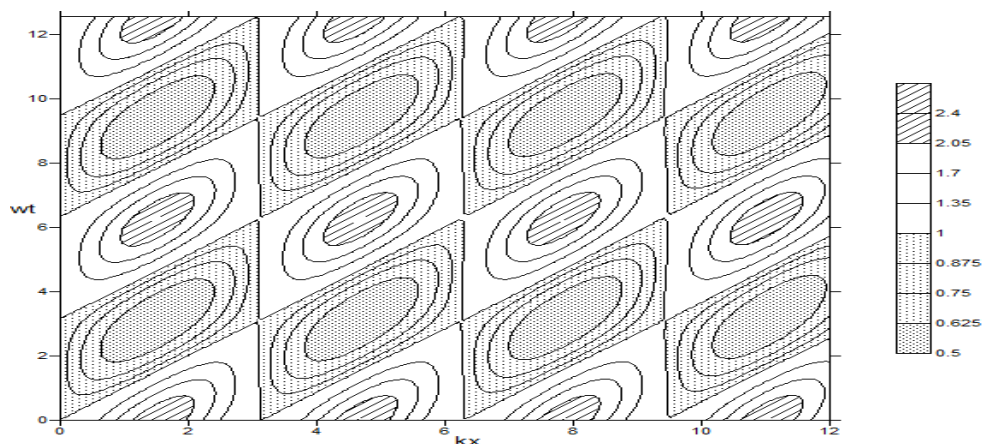


Рис. 1. Распределение концентрации ПАВ на линии уреза над бесконечным откосом

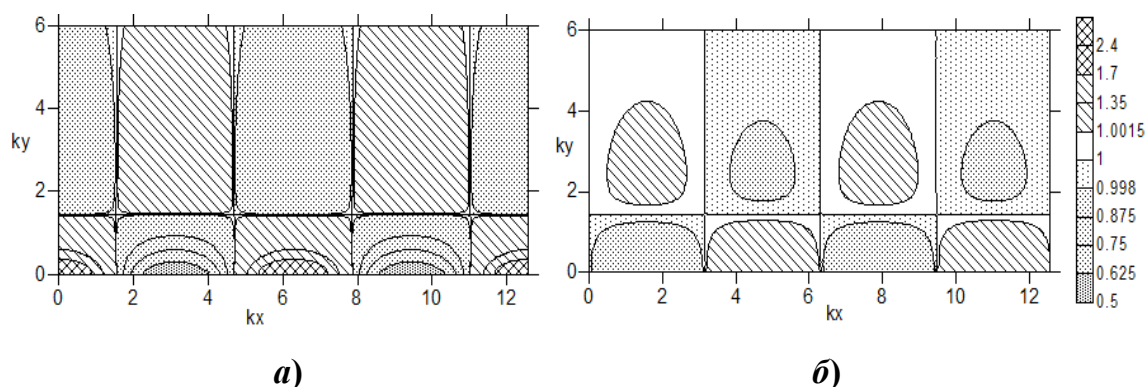


Рис. 2. Распределение концентрации ПАВ над бесконечным откосом:  
 а –  $t = 40$  с (максимум), б –  $t = 80$  с (минимум)

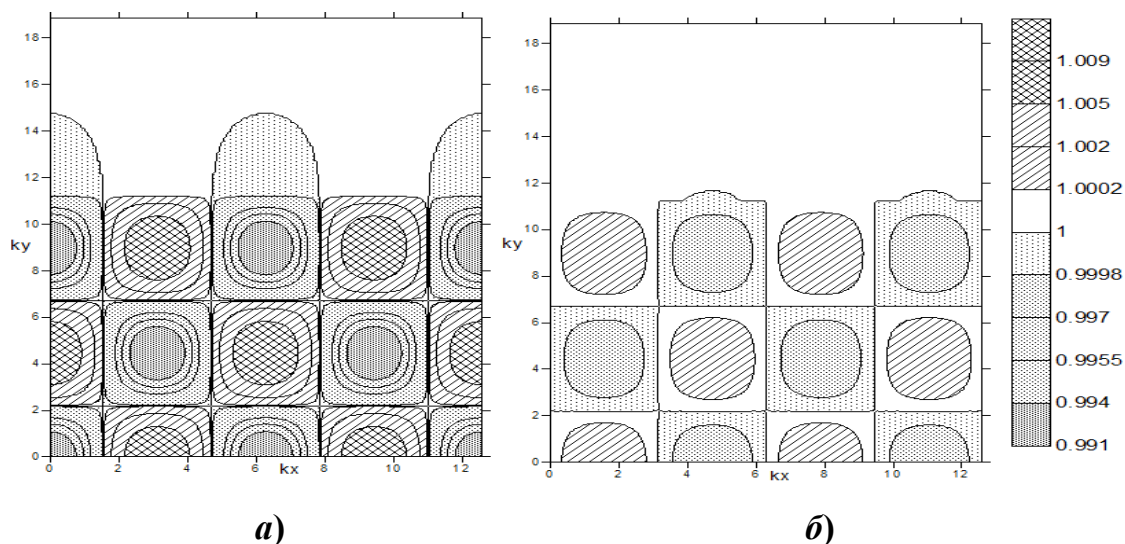


Рис. 3. Распределение концентрации ПАВ над «шельфом-ступенькой»:  
 а –  $t = 40$  с (максимум), б –  $t = 80$  с (минимум)

волны приходится одна зона конвергенции и одна зона дивергенции ПАВ.

Приведенные в п. 1 результаты соответствуют модели адвекции, однако в реальных акваториях происходят дополнительно диффузионные и релаксационные процессы, которые необходимо учитывать. Далее представлено распределение концентрации ПАВ вдоль линии уреза с учетом этих процессов.

2. Распределение концентраций ПАВ вдоль линии уреза для модели адвекции–диффузии–релаксации представлено на рис. 5 над линейно – наклонным шельфом(низшая

мода,  $k = 0.02$  [м<sup>-1</sup>],  $\omega = 0.08$  [рад/с], угол наклона  $0.03$  [рад]).

Учет диффузии и релаксации приводит к тому, что деформации концентрации становятся более размытыми и менее выраженными (рис. 5,а), а при значительном влиянии этих факторов распределение концентрации вырождается, и концентрация на урезе изменяется стационарно в виде бегущей квазисинусоидальной волны отклонения уровня очень малой амплитуды (рис. 5, б).

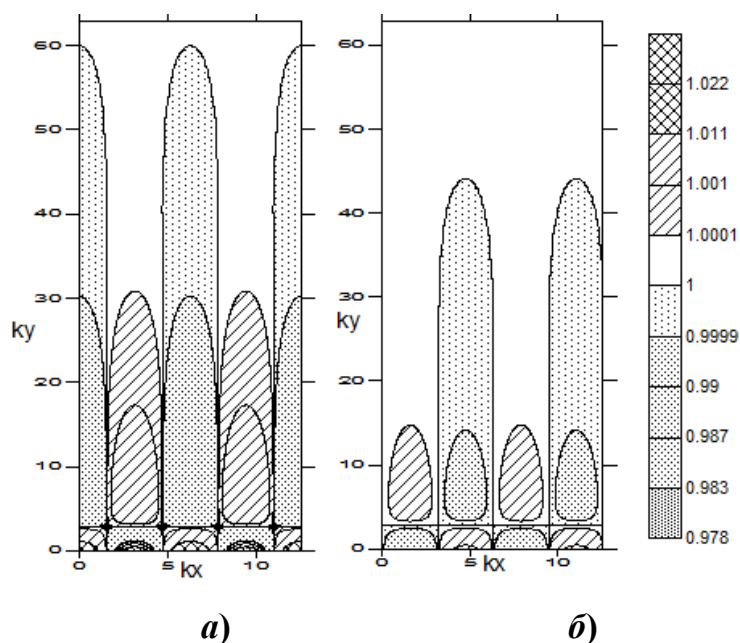


Рис. 4. Распределение концентрации ПАВ над вогнутым экспоненциальным шельфом:  
 а –  $t = 40$  с (максимум), б –  $t = 80$  с (минимум)

Далее (рис. 6) представлено распределение концентраций ПАВ в различные моменты времени для модели адвекции – диффузии – релаксации над вогнутым экспоненциаль-

ным шельфом (низшая мода,  $k = 0.016$  [м<sup>-1</sup>],  $\omega = 0.05$  [рад/с], характерная ширина шельфа 0.03 м, постоянная глубина на бесконечности 1.3 м). На рис. 6 отчетливо видно искривле-

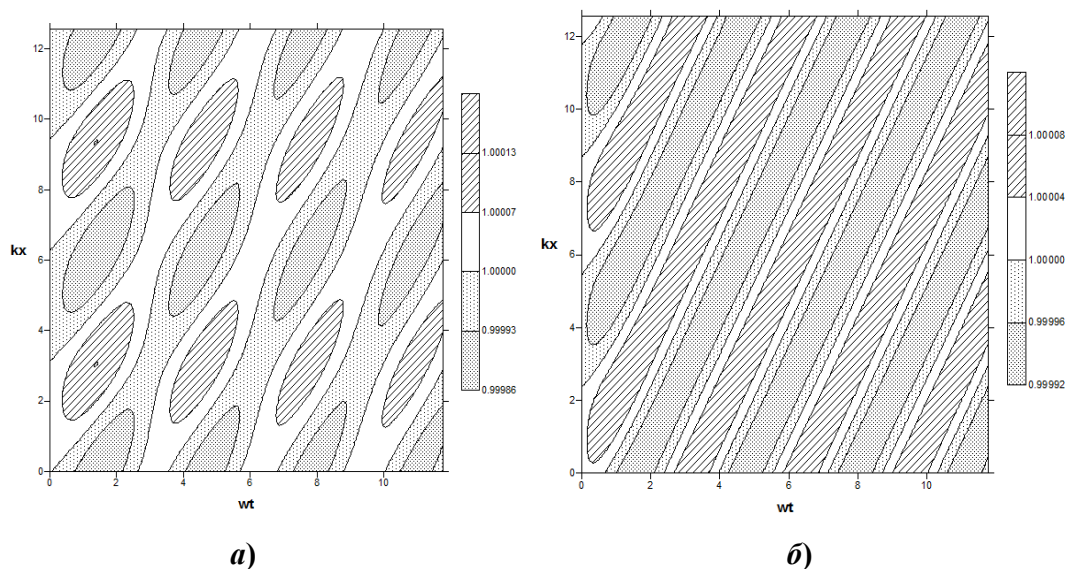


Рис. 5.  $x-t$ -диаграмма распределения концентрации ПАВ на линии среза:  
 а – слабая диффузия и релаксация ( $D = 5$  [м<sup>2</sup>/с],  $\tau = 5$  [ч]);  
 б – значительная диффузия и релаксация ( $D = 100$  [м<sup>2</sup>/с],  $\tau = 3$  [мин])

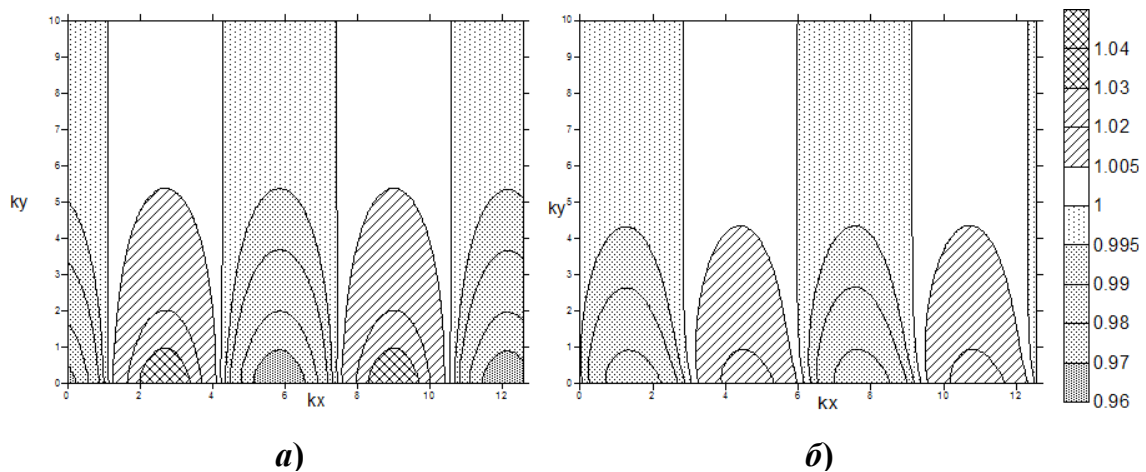


Рис. 6. Распределение концентрации ПАВ для модели адвекции–диффузии–релаксации над вогнутым экспоненциальным шельфом:  $a - t = 300$  с,  $b - t = 600$  с

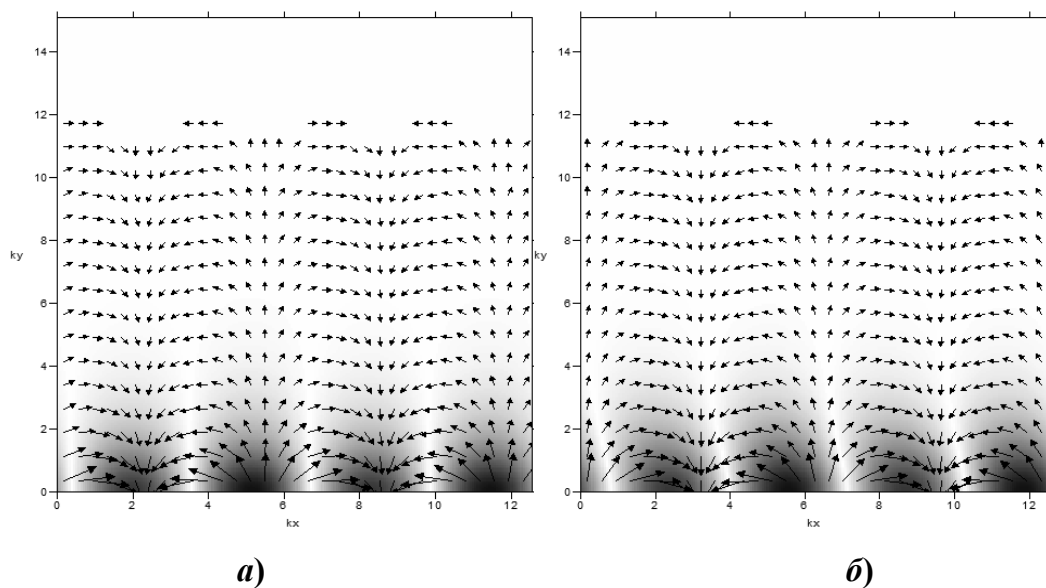


Рис. 7. Динамика пленки ПАВ для модели адвекции–диффузии–релаксации и поле скорости течения, индуцированного краевыми волнами:  $a - t = 300$  с,  $b - t = 1000$  с

ние контуров равной концентрации с течением времени, обусловленное влиянием диффузии и релаксации.

Более отчетливо характер динамики пленки ПАВ для модели адвекции –диффузии –релаксации (низшая мода,  $k = 0.016$  [м<sup>-1</sup>],  $\omega = 0.05$  [рад/с], характерная ширина шельфа 0.03 м, постоянная глубина на бесконечности 1.3 м) можно проанализировать, наложив на

поле концентрации (цветом – зоны сгущения и разряжения) и поля скоростей в векторном виде (рис. 7).

3. Распределение концентрации ПАВ в горизонтальной плоскости в различные моменты времени в поле линейной суперпозиции топографических захваченных (краевых) волн одной моды (низшей), распространяющихся над линейно–наклонным шельфом,

представлено на рис. 8 с диапазоном изменения волнового числа  $[-0.6; 0.6]$   $[м^{-1}]$  и соответствующих им частот  $[0; 0.6]$   $[рад/с]$ , угол наклона  $0.06$   $[рад]$ . В этом случае смещение водной поверхности может быть записано в виде ряда Фурье [2; 7]

$$\eta(x, y, t) = \sum_{n=0}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} A_n(k) \exp(-|k|y) L_n(2|k|y) \exp(i(\omega_n t - kx)) dk,$$

где:

$$A_n(k) = \frac{k}{\pi} \int_0^{+\infty} \exp(-|k|y) L_n(2|k|y) dy \int_{-\infty}^{+\infty} \eta_0(x, y) \exp(ikx) dx.$$

Компоненты горизонтальной скорости легко могут быть выражены через отклонение поверхности с помощью линейной теории длинных волн в неоднородном океане. Отчетливо заметно влияние диффузии и релаксации на 10 – 30 секундах расчета, приводящее к искривлению деформаций концентрации.

4. Распределение концентрации ПАВ в поле триад нелинейно взаимодействующих топографических захваченных (краевых) волн различных мод для модели шельфа–ступеньки для триады «102» ( $k_1=0.02$   $[м^{-1}]$ ,  $k_2=0.03$   $[м^{-1}]$ ,  $k_3=0.05$   $[м^{-1}]$ ,  $\omega_1 = 0.06$   $[рад/с]$ ,  $\omega_2 = 0.1$   $[рад/с]$ ,  $\omega_3 = 0.16$   $[рад/с]$ , высота глубоководной части ступеньки 10 м, мелководной – 1 м, ширина 540 м) представлено на рис. 9 и рис. 10. В такой постановке возвышение водной поверхности  $\eta(x, y, t)$  представимо в виде [2; 7; 14; 18; 22]:

$$\eta = \sum_r \sum_n \frac{1}{2} A_r^n(\epsilon T) F_r^n(x) e^{i(k_r y - \omega_r^n t)} + K.C.,$$

где амплитуды резонансно взаимодействующих мод  $A_r^n$  медленно изменяются во времени и в нестационарном случае удовлетворяют системе уравнений:

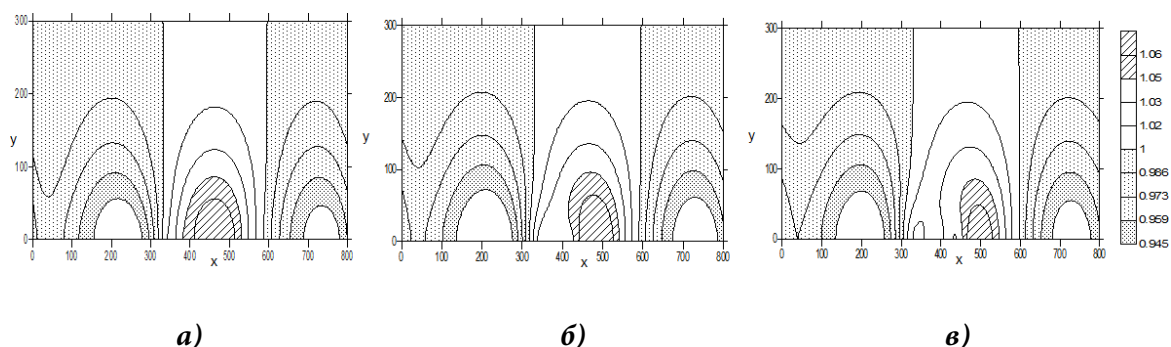


Рис. 8. Распределение концентрации ПАВ в поле линейной суперпозиции топографических захваченных (краевых) волн низшей моды:  
 $a - t = 10$  с,  $b - t = 20$  с,  $v - t = 30$  с



$$\begin{aligned} \frac{\partial A_r^n}{\partial T} = & i \sum_p \sum_q \sum_l \sum_m \left\{ T_{pqr}^{lmn} A_p^l A_q^m \theta(k_p + k_q, k_r) \theta(\omega_p^l + \omega_q^m, \omega_r^n) + \right. \\ & + T_{pqr}^{lmn} A_p^l A_q^{m*} \theta(k_p - k_q, k_r) \theta(\omega_p^l - \omega_q^m, \omega_r^n) + \\ & \left. + T_{pqr}^{mln} A_p^l A_q^m \theta(k_q - k_p, k_r) \theta(\omega_q^m - \omega_p^l, \omega_r^n) \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

где:  $l, m, n$  – номера мод,  $p, q, r$  – номера волн, участвующих во взаимодействии,  $\theta(a, b) = 0$  при  $a \neq b$ ,  $\theta(a, b) = 1$  при  $a = b$ ,  $+T$  и  $-T$  – коэффициенты взаимодействия для суммарных и разностных взаимодействий соответственно:

$$\begin{aligned} \pm T_{pqr}^{lmn} = & \frac{g}{4\omega_r^n \omega_p^l \omega_q^m} \int_0^\infty \left[ \left\{ -\omega_p^l (\omega_q^m \pm 2\omega_p^l) \frac{d(F_r^n F_p^l)}{dy} \frac{dF_q^m}{dy} - \omega_q^m (\omega_p^l \pm 2\omega_q^m) \frac{dF_p^l}{dy} \frac{d(F_r^n F_q^m)}{dy} + \right. \right. \\ & + F_r^n F_p^l F_q^m (\mp 4ghk_p k_q^2 - 2k_p k_q ((\omega_p^l)^2 + \omega_p^l \omega_q^m + (\omega_q^m)^2) - \omega_p^l \omega_q^m (k_p^2 + k_q^2)) + \\ & \left. \left. + 2F_r^n \frac{dF_p^l}{dy} \frac{dF_q^m}{dy} (2ghk_p k_q \pm (\omega_p^l)^2 + \omega_p^l \omega_q^m \pm (\omega_q^m)^2) \right\} \mp 2g \frac{dh}{dy} \frac{dF_p^l}{dy} \frac{dF_q^m}{dy} \frac{dF_r^n}{dy} \right] dy. \end{aligned}$$

Стационарный случай соответствует устойчивому состоянию равновесия системы (2). Поле скорости восстанавливалось согласно смещению  $\eta$ .

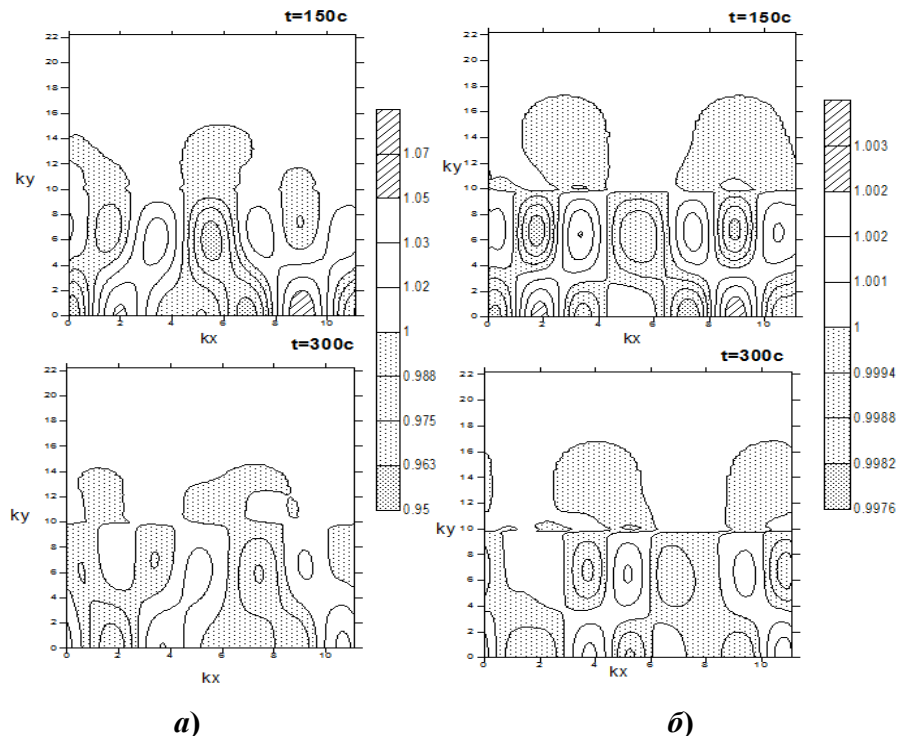


Рис. 9. Распределение концентрации ПАВ в поле триад краевых волн для модели шельфа-ступеньки: а – нестационарный случай; б – стационарный случай

Распределение концентрации ПАВ, отвечающее волновому полю со стационарными значениями амплитуд (рис. 9, а), обладает достаточно сильной изменчивостью и резко спадает за областью ступеньки, а распределение концентрации для нестационарного случая, изображенное на рис. 9, б, также нерегулярно, но характеризуется большим проникновением в глубоководную область. Максимумы отклонения концентрации от равновесного значения достигаются не только на линии уреза, а также и по всей зоне мелководной части ступеньки. Над глубоководной частью шельфа отклонения концентрации примеси незначительные. Необходимо отметить, что, по сравнению с шельфом постоянного уклона, в данном случае волновое поле содержит значительно больше вихрей, поскольку, по существу, отсутствует ослабление поля до скачка глубин.

Сравнивая уровни концентрации, представленные на рис. 10, можно заметить, что нестационарный вариант взаимодействия триад краевых волн вызывает большие отклонения концентрации от равновесного значения (т. е. происходит увеличение контрастности).

5. Распределение концентрации ПАВ вдоль линии уреза в поле топографических

захваченных (краевых) волн в бассейне с переменной вдоль берега топографией представлено на рис. 11. Изменение квадрата амплитуды для модели «шельфа – ступеньки» может быть вычислено согласно [7]:

$$A^2 \sim \frac{1}{k \left\{ h_1 l + \frac{h_1 \sin 2l \sqrt{\frac{\omega^2}{gh_1} - k^2}}{2 \sqrt{\frac{\omega^2}{gh_1} - k^2}} + \frac{h_2 \cos^2 l \sqrt{\frac{\omega^2}{gh_1} - k^2}}{\sqrt{k^2 - \frac{\omega^2}{gh_2}}} \right\}}$$

На рис. 11 приведены результаты расчетов для условий, когда ширина ступеньки ( $l$ ) изменяется в диапазоне от 80 до 800 км при отношении глубин на шельфе ( $h_1$ ) и вне его ( $h_2$ )  $1/9$ . Видно, что изменения параметров краевой волны ( $\omega = 0.02$  [рад/с]) приводят к соответствующим неоднородностям деформирующим концентрацию ПАВ во вдольбереговом направлении, в частности, к понижению контрастности морской поверхности.

Анализ изменений контрастности поверхности моря, обусловленных деформациями поля концентрации ПАВ под влиянием течений, индуцированных краевыми волнами, показывает ее сложную, нестационарную пространственно-временную структуру в шельфовой зоне даже в рамках простейших

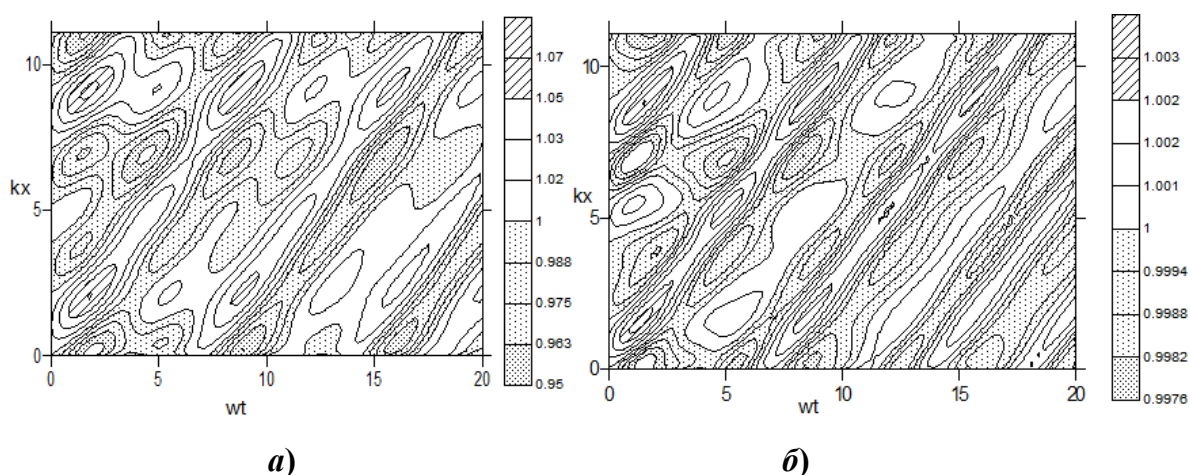


Рис. 10.  $x-t$ -диаграмма распределения концентрации ПАВ на линии уреза в поле триад краевых волн для модели шельфа-ступеньки: а – нестационарный случай; б – стационарный случай

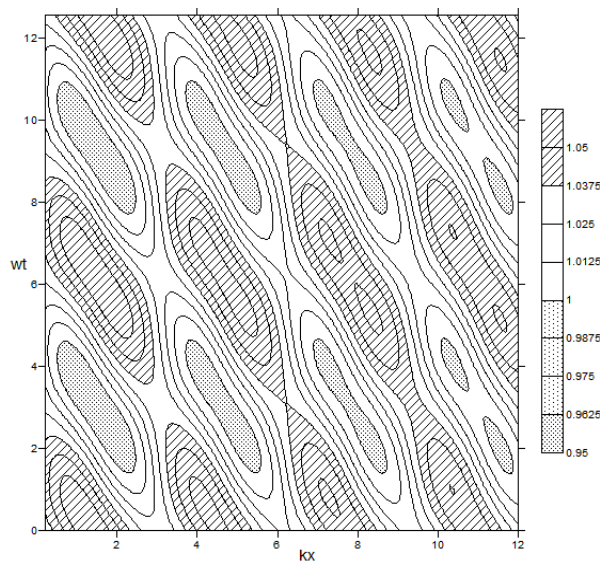


Рис. 11.  $x-t$ -диаграмма распределения концентрации ПАВ на линии уреза в поле краевых волн в бассейне с переменной вдоль берега топографией, низшая мода

линейных моделей для одномодовых волн. Учет разномодового состава и влияния нелинейности, а также факторов диффузии и релаксации приводит к еще большему усложнению картины распределения пленки ПАВ.

### Заключение

Представлены режимы динамики загрязнений и примесей в поле топографических захваченных волн в рамках модели адвекции, дополненной диффузионными и релаксационными слагаемыми. Полученные распределения концентрации могут быть использованы при интерпретации радиолокационных снимков.

Показано, что краевые волны умеренных амплитуд со скоростями течений в пределах 10–15 см/с приводят к довольно слабым изменениям концентрации пленки, как правило, не превышающим 1%. В отдельных случаях (краевые волны высших мод, нестационарное нелинейное взаимодействие в триадах, при формировании аномально больших краевых волн) контрастность может достигать 5%.

Следует сделать вывод о том, что краевые волны, должно быть, слабо различимы на ра-

диолокационных изображениях, за исключением, возможно, отдельных аномальных событий.

Представленные результаты поисковой научно-исследовательской работы получены в рамках реализации мероприятия 1.3.2 «Проведение научных исследований целевыми аспирантами» ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг., а также при поддержке грантов Президента РФ для молодых российских ученых – докторов наук (МД–99.2010.5) и РФФИ 10 05 00199а.

### ЛИТЕРАТУРА:

1. Атлас аннотированных радиолокационных изображений морской поверхности, полученных космическим аппаратом «АЛМАЗ-1» / Дикинис А.В. и др.; под ред. Карлина Л.Н. М.: ГЕОС, 1999. 118 с.
2. Динамика краевых волн в океане / Полухина О.Е. и др. Новгород: НГТУ, 2006. 136 с.
3. Динамика пленок ПАВ на морской поверхности при прохождении внутренних волн / Козлов С.И. и др. // Морской гидрофизический журнал. 1987. № 4. С. 3-8.
4. Динамика пленок поверхностно-активных веществ в поле неоднородных течений / Козлов С.И. и др. // Метеорология и гидрология. 1987. № 1. С. 84-89.
5. Ермаков С.А. Влияние пленок на динамику гравитационно-капиллярных волн. Н. Новгород: ИПФ РАН, 2010. 164 с.
6. Иванов А.Ю. Стики и пленочные образования на космических радиолокационных изображениях // Исследование Земли из космоса. 2007. № 3. С. 73-96.
7. Куркин А.А. Нелинейная и нестационарная динамика длинных волн в прибрежной зоне. Н.Новгород: НГТУ, 2005. 330 с.
8. Лаврова О.Ю., Митягина М.И. Спутниковый мониторинг антропогенных загрязнений прибрежной зоны // Земля и Вселенная. 2008. № 1. С. 26-34.
9. Митягина М.И., Лаврова О.Ю. Спутниковые наблюдения вихревых и волновых процессов в прибрежной зоне северо-восточной части Черного моря // 2009. № 5. С. 72-79.
10. Митягина М.И., Лаврова О.Ю. Спутниковые наблюдения поверхностных проявлений внутренних волн в морях без приливов // Современные проблемы дистанционного зондирования Зем-

- ли из космоса. Сборник научных статей. Т. 7. № 1. 2010. С. 260-272.
11. Моделирование динамики пленок поверхностно – активных веществ в поле линейных бегущих краевых волн на шельфе моря / Авербух Е.Л. и др.// Вестник МГОУ. Серия «Естественные науки». 2011. № 2. С. 109-122.
  12. Некрасов А.В. Практикум по динамике океана. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 319 с.
  13. Оперативный спутниковый мониторинг акваторий Черного, Балтийского и Каспийского морей в 2009–2010 годах / Лаврова О.Ю. и др. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Сборник научных статей. Т. 7. № 1. 2010. С. 168-185.
  14. О нелинейных взаимодействиях в триадах краевых волн на шельфе моря/ Дубинина В.А. и др. // Морской гидрофизический журнал. 2008. № 3. С. 3-19.
  15. Пленочный механизм воздействия внутренних волн на ветровую рябь / Ермаков С.А. и др. // В сб.: «Воздействие крупномасштабных внутренних волн на морскую поверхность», под редакцией Пелиновского Е.Н. ИПФ АН СССР. № 31. 1982. С. 31-51.
  16. Проявление внутренних волн на морской поверхности в северо-восточной части Черного моря / Лаврова О.Ю. и др.// Исследование Земли из космоса. 2009. № 6. С. 49-55.
  17. Рабинович А.Б. Длинные гравитационные волны в океане: захват, резонанс, излучение. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. 325 с.
  18. Резонансные трехволновые взаимодействия краевых волн Стокса / Дубинина В.А. и др.// Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42. № 2. С. 254-261.
  19. Талипова Т.Г. Динамика нелинейных длинных внутренних волн в стратифицированной жидкости: дис.... д-ра физ.-мат. наук. Н. Новгород, 2004. 356 с.
  20. Тескер И.М. Снижение геоэкологических последствий загрязнения земной поверхности при разливах углеводородного сырья и прогноз необходимых сил и средств для их ликвидации. М., 2005.
  21. Уединенные внутренние волны и их поверхностные проявления на шельфе моря Лаптевых / Красильщиков А.А. и др. // Известия Академии инженерных наук РФ. Прикладная математика и механика. 2003. Т. 4 С. 156-170.
  22. Evolution equations for edge waves and shear waves on longshore uniform beaches / Kirby J.T. et al. // Proc. 26th Int. Conf. Coastal Engineering (Copenhagen. June 1998). 1998. P. 203 – 216.