

Инженерная экология и дизайн

Математическая модель динамики разлива нефтепродукта

¹Александр Васильевич Иванов

²Константин Николаевич Макаров

¹Сочинский государственный университет, Россия

354000, г. Сочи, ул. Советская, 26 а

Аспирант

E-mail: shurik-2003@mail.ru

²Сочинский государственный университет, Россия

354000, г. Сочи, ул. Советская, 26 а

Доктор технических наук, профессор

E-mail: ktk99@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается математическая модель динамики нефтяного загрязнения в прибрежной зоне моря. Модель описывает основные процессы первичного растекания и последующего дрейфа нефтяного пятна. Калибровка модели выполнена по данным натурного эксперимента.

Ключевые слова: разлив нефтепродукта, прибрежная зона моря, поле течений, натурный эксперимент, калибровка математической модели.

УДК 502.3

Прогноз динамики разливов нефтепродуктов является актуальной задачей для проектирования портовых гидротехнических сооружений, оценки экологического состояния прибрежных вод, оценки риска аварий нефтеразведочных и нефтедобывающих сооружений.

Автором разработаны математическая модель и компьютерная программа для расчета дрейфа нефтяного разлива в прибрежной зоне моря.

Задача решается в предположении, что аварийный разлив нефтепродукта объемом W произошел в точке с координатами X_0, Y_0 . Расчет выполняется на прямоугольной сетке, в узлах которой заданы глубины $D[i, j]$. Поле течений считается заданным, то есть в узлах сетки известны составляющие скорости суммарного течения $U[i, j], V[i, j]$. Тогда исходными данными для решения задачи являются следующие:

1. Сетка рельефа $D[i, j]$.
2. Поле течений $U[i, j], V[i, j]$ в узлах сетки.
3. Средняя высота волн при расчетной гидрометеоситуации, h_b , м.
4. Продолжительность шторма D_T , часы.
5. Объем разлива нефтепродукта W , м³.
6. Координаты точки разлива нефтепродукта X_0, Y_0 , м.

При моделировании процесса распространения разлива нефтепродукта используются следующие физические представления:

1. После разлива нефтепродукта на поверхности моря он испытывает растекание по поверхности и снос суммарным течением. Растекание происходит при штилевых условиях (или близких к ним) до пленки толщиной $T_{n\lambda min1} = 100 \text{ мкм} = 0.0001 \text{ м}$. При штормовых условиях нефть растекается плохо и собирается в сгустки на небольшой площади. При этом минимальная толщина пленки $T_{n\lambda min2} = 1 \text{ см} = 0.01 \text{ м}$.

2. Согласно данным наблюдений, приведенным в [1], 1 м³ попавшей на поверхность моря нефти при штилевых условиях (принимается, что высота волн $h_b \leq 1.0 \text{ м}$) растекается за время $D_t = 10 \text{ мин}$ на площади $S_{o1} = 1800 \text{ м}^2$. Минимальная толщина слоя нефти – порядка $T_{n\lambda min1} = 100 \text{ мкм} = 0.0001 \text{ м}$. Тогда радиус пятна разлива составит $R_1 = (S_{o1}/\pi)^{0.5} = 24 \text{ м}$, исходная толщина нефтяной пленки $T_{n\lambda is1} = W/S_{o1} = 1/1800 = 0.0006 \text{ м}$, скорость растекания разлива $V_{pac1} = R_1/D_t = 0.04 \text{ м/с}$. Предельная площадь разлива составит: $S_{пред} = W / T_{n\lambda min1} = 10000 \text{ м}^2$. Таким образом, нефть будет растекаться до тех пор, пока площадь пятна

не составит $S_{пред}$. После этого пятно будет только дрейфовать в направлении течения, $V_{рас} = 0.0$.

3. При штормовых условиях ($h_b \leq 1.0$ м) нефть растекается практически мгновенно на площади $S_{пред} = W / T_{нлmin2}$, и в дальнейшем это пятно дрейфует по направлению течения.

Алгоритм расчета следующий (рис. 1):

1. По заданным координатам центра разлива X_o , Y_o , объему разлива W и заданном времени шторма D_T , определяются:

- шаг расчета по времени $D_{st} = D_T/9$ (то есть время шторма делится на 9 временных интервалов);

- при $h_b \leq 1.0$ м, $S_1 = W / T_{нлuc1} = W / 0.0006$, $R = (S_1/\pi)^{0.5}$,

$S_{пред} = W / T_{нлmin1} = W / 0.0001$, $V_{рас} = 0.04$ м/с;

- при $h_b > 1.0$ м, $S_1 = W / T_{нлmin2} = W / 0.01$, $R = (S_1/\pi)^{0.5}$, $S_{пред} = S_1$, $V_{рас} = 0.0$ м/с;

- рассчитываются исходные координаты 8 точек, аппроксимирующих исходное пятно разлива на шаге расчета 1:

$X_{1,1} = X_o$, $Y_{1,1} = Y_o + R$;

$X_{1,2} = X_o + R \times 0.707$, $Y_{1,2} = Y_o + R \times 0.707$;

$X_{1,3} = X_o + R$, $Y_{1,3} = Y_o$;

$X_{1,4} = X_o + R \times 0.707$, $Y_{1,4} = Y_o - R \times 0.707$;

$X_{1,5} = X_o$, $Y_{1,5} = Y_o - R$; $X_{1,6} = X_o - R \times 0.707$, $Y_{1,6} = Y_o - R \times 0.707$;

$X_{1,7} = X_o - R$, $Y_{1,7} = Y_o$; $X_{1,8} = X_o - R \times 0.707$, $Y_{1,8} = Y_o + R \times 0.707$,

где $\sin(45^\circ) = \cos(45^\circ) = 0.707$.

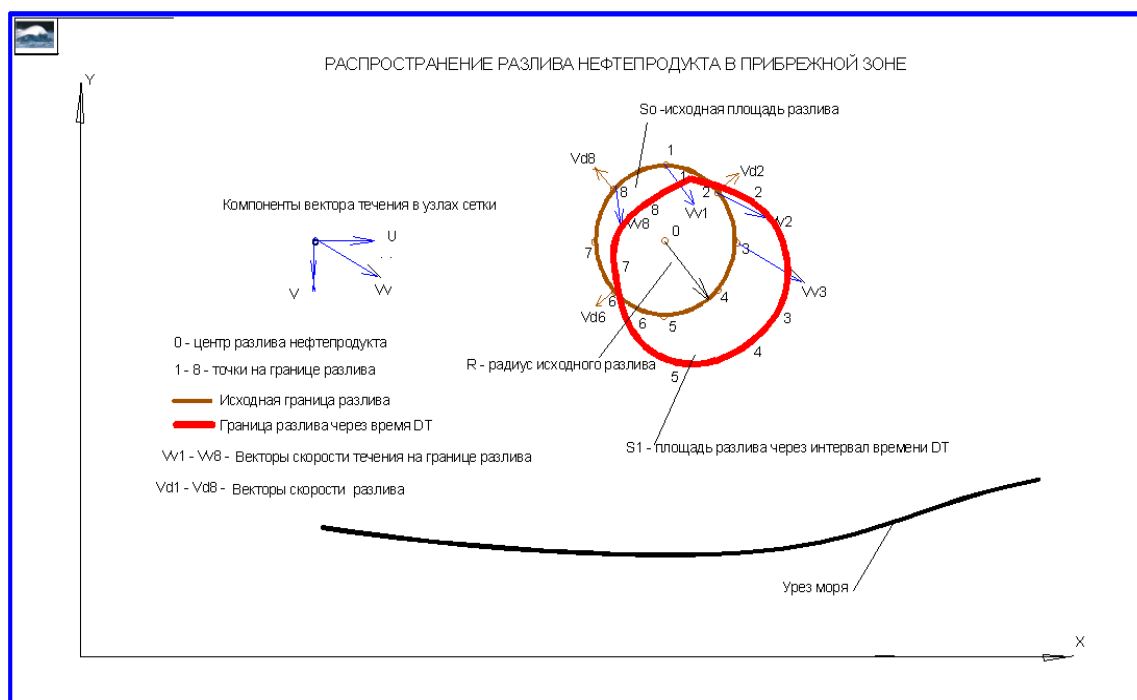


Рис. 1. Распространение разлива нефтепродукта в прибрежной зоне

2. По методике [2, 3] рассчитываются компоненты скорости течения в точках 1 – 8 на шаге расчета i :

$U_{i,1} = U_{mi,1}$, $V_{i,1} = V_{mi,1} + V_{рас}$;

$U_{i,2} = U_{mi,2} + V_{рас} \times 0.707$, $V_{i,2} = V_{mi,2} + V_{рас} \times 0.707$;

$U_{i,3} = U_{mi,3} + V_{рас}$, $V_{i,3} = V_{mi,3}$;

$U_{i,4} = U_{mi,4} + V_{рас} \times 0.707$, $V_{i,4} = V_{mi,4} - V_{рас} \times 0.707$;

$U_{i,5} = U_{mi,5}$, $V_{i,5} = V_{mi,5} - V_{рас}$;

$U_{i,6} = U_{mi,6} - V_{рас} \times 0.707$, $V_{i,6} = V_{mi,6} - V_{рас} \times 0.707$;

$U_{i,7} = U_{mi,7} - V_{рас}$, $V_{i,7} = V_{mi,7}$;

$$U_{i,8} = U_{mi,8} - V_{pac} \times 0.707, V_{i,8} = V_{mi,8} + V_{pac} \times 0.707,$$

где $U_{mi,1} \dots U_{mi,8}$, $V_{mi,1} \dots V_{mi,8}$ – компоненты скорости сносящего течения в точках аппроксимации пятна разлива.

3. Рассчитываются новые координаты точек аппроксимации пятна разлива на шаге расчета $i+1$ для точек $j = 1 \dots 8$:

$$X_{i+1,j} = X_{i,j} + K_{клx} D_{st} \times U_{i,j}; Y_{i+1,j} = Y_{i,j} + K_{кly} D_{st} \times V_{i,j}.$$

где $K_{клx}$, $K_{кly}$ – калибровочные коэффициенты, определяемые по натурным или экспериментальным данным. При отсутствии таких данных значения указанных коэффициентов принимаются равными 1.

4. Рассчитывается новая площадь пятна разлива

$$S_{i+1} = 0.5 \times \sum_{j=1}^n Y_j (X_{i-1} - X_{i+1}), \text{ где } n = 1 \dots 8 - \text{количество точек аппроксимации}$$

пятна разлива. Если $S_{i+1} > S_{пред}$, то принимается $V_{pac} = 0$.

5. Если шаг по времени $i \leq 9$, то производится переход к пункту 2.

Калибровка приведенной математической модели динамики разлива нефтепродукта выполнялась по данным аэрофотосъемки, предоставленным Сочинским Центром по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Черного и Азовского морей (СЦГМС ЧАМ).

В июне – августе 2004 г. СЦГМС ЧАМ совместно с ААНИИ проводил аэрофотографический мониторинг загрязнений прибрежной зоны моря в пределах всего Краснодарского края.

В рамках этой работы был выполнен натурный эксперимент по изучению динамики разлива нефтепродукта в прибрежной акватории Черного моря, расположенной к западу от бухты Голубой (вблизи г. Геленджика) – рис. 2, 3.

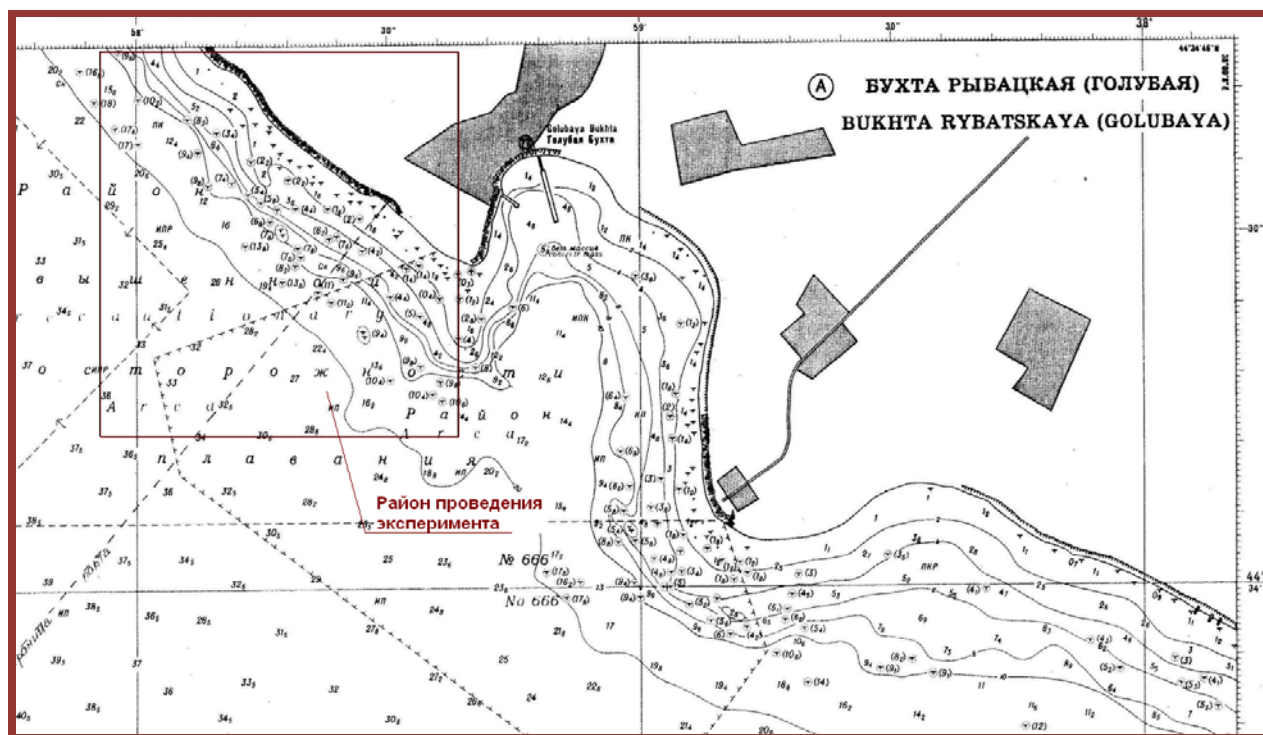


Рис. 2. Гидрографическая карта района исследований

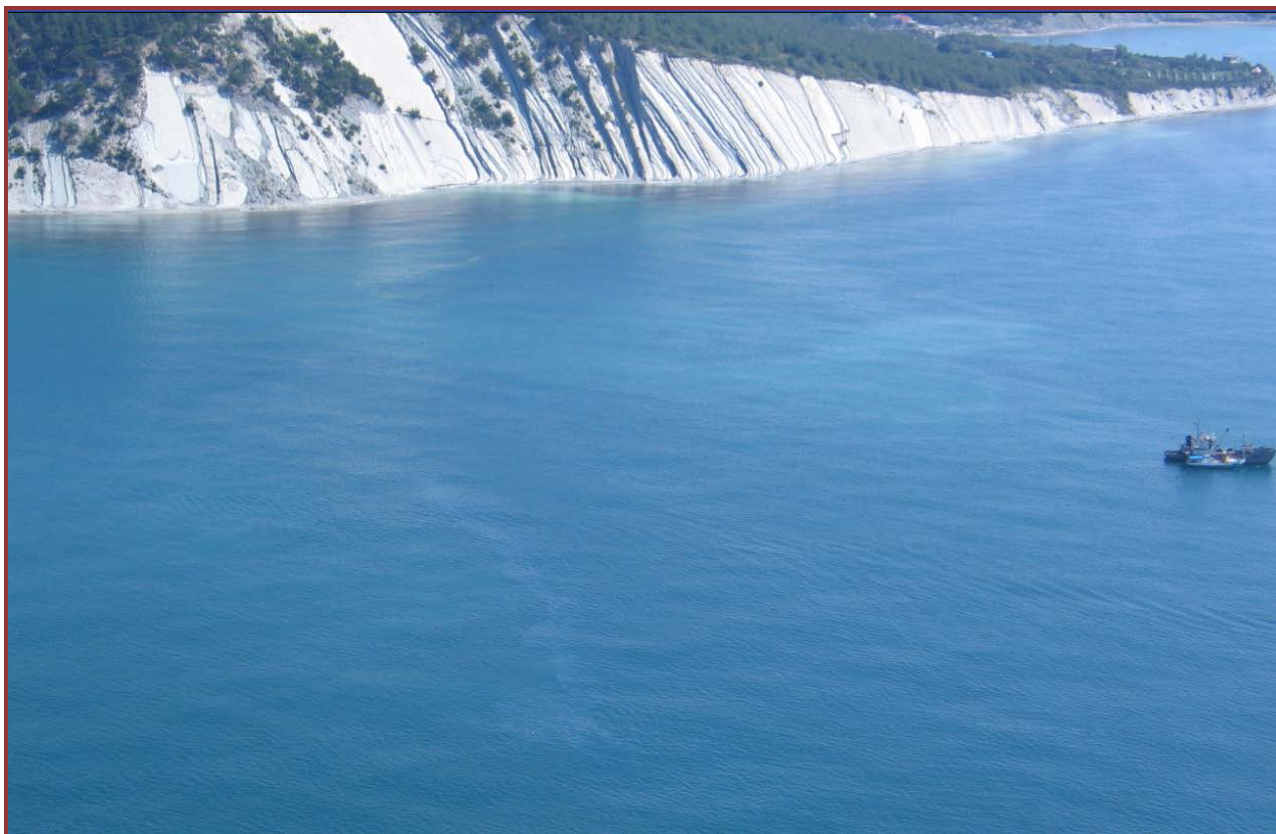


Рис. 3. Общий вид экспериментального участка

Эксперимент заключался в следующем. С плавсредства был разлит в акваторию нефтепродукт (масло) в объеме 100 л – рис. 4. Далее с интервалом 30 мин. выполнялось фотографирование с вертолета динамики этого разлива – рис. 5.

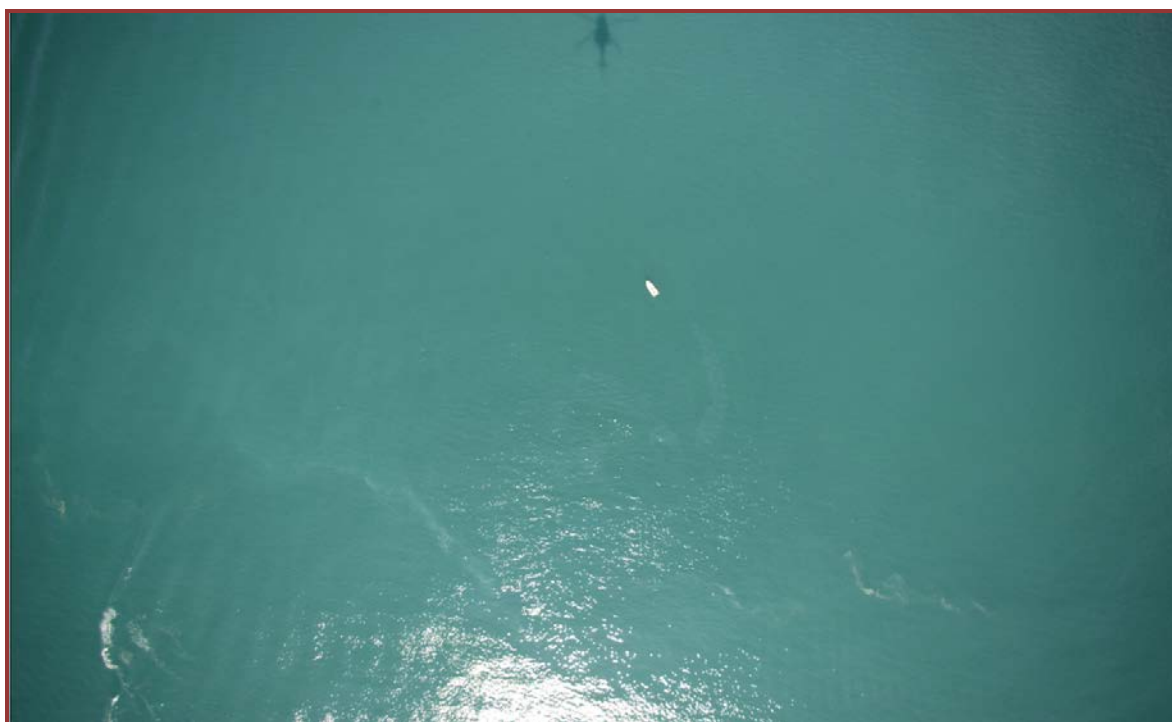


Рис. 4. Разлив нефтепродукта с плавсредства – начало эксперимента

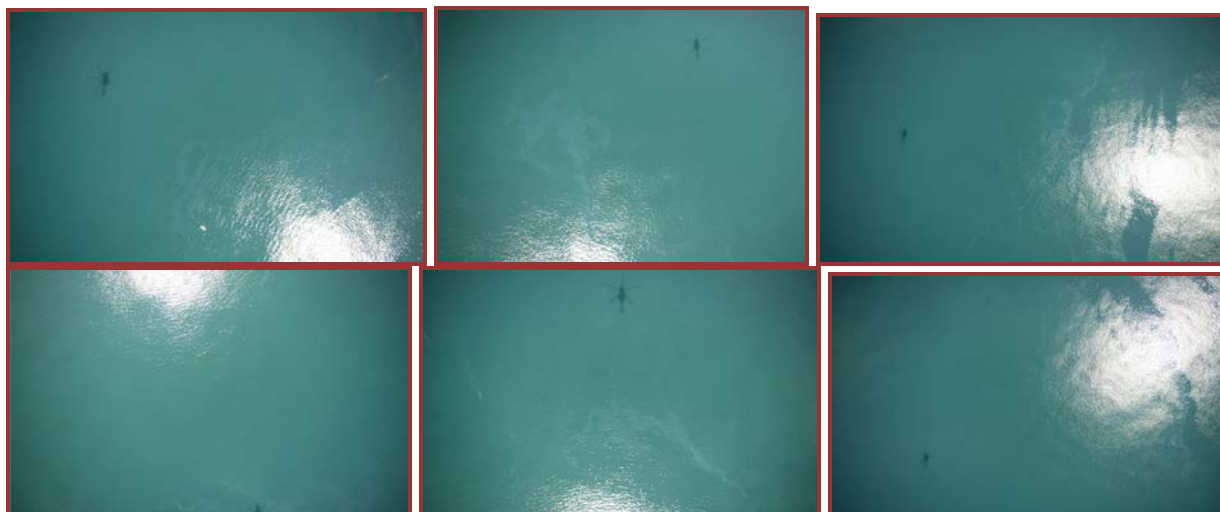


Рис. 5. Динамика разлива нефтепродукта в течение 3 часов по данным аэрофотографирования

На Морской гидрометеостанции г. Геленджика была получена информация о скорости и направлении ветра за 6 часов до эксперимента и в течение его выполнения. В среднем направление ветра было ЮЮВ, скорость – порядка 4 м/с.

Автором была разработана цифровая модель прибрежной зоны моря в районе экспериментального участка – рис. 6. На отображение цифровой модели были нанесены данные аэрофотографирования динамики пятна нефтепродукта – рис. 7.

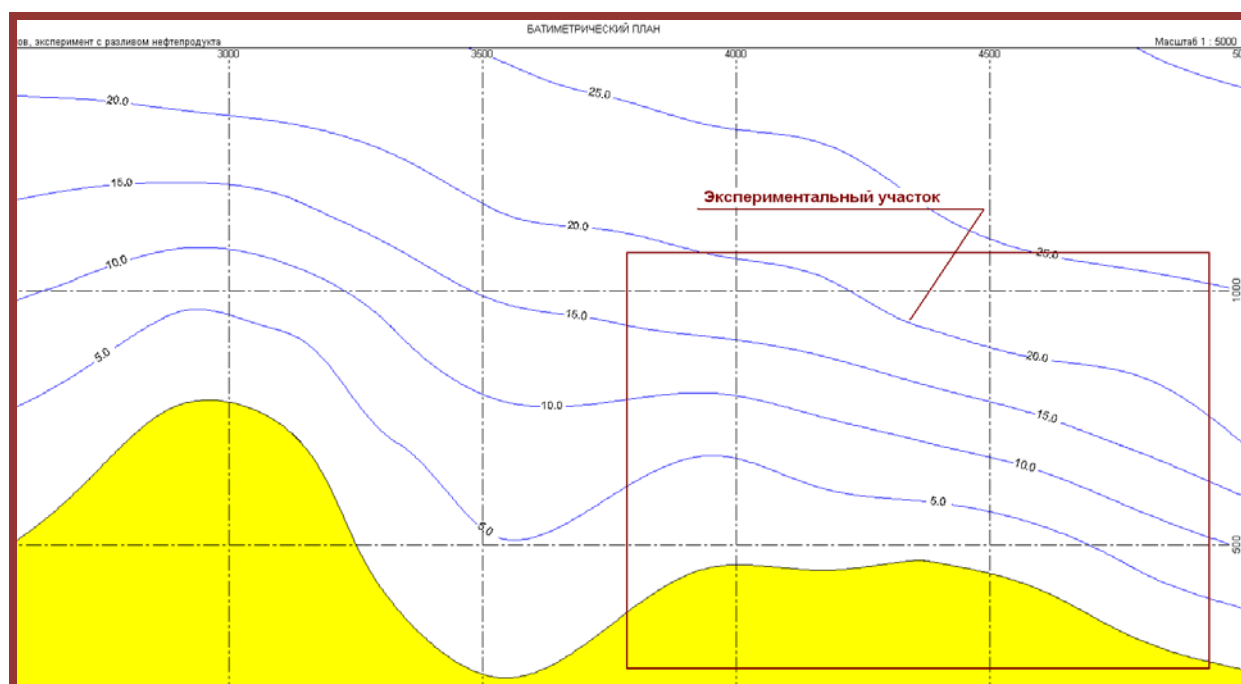


Рис. 6. Отображение цифровой модели прибрежной зоны с участком экспериментальных работ

По данным об осредненной гидрометеорологической ситуации было рассчитано поле течений в прибрежной зоне [2, 3] на момент проведения эксперимента – рис. 8.

Далее по приведенной математической модели выполнялись расчеты динамики пятна загрязнения нефтепродуктом и сопоставлялись с данными эксперимента. В процессе расчетов для калибровки модели варьировались величины калибровочных коэффициентов $K_{клх}$, $K_{клу}$.

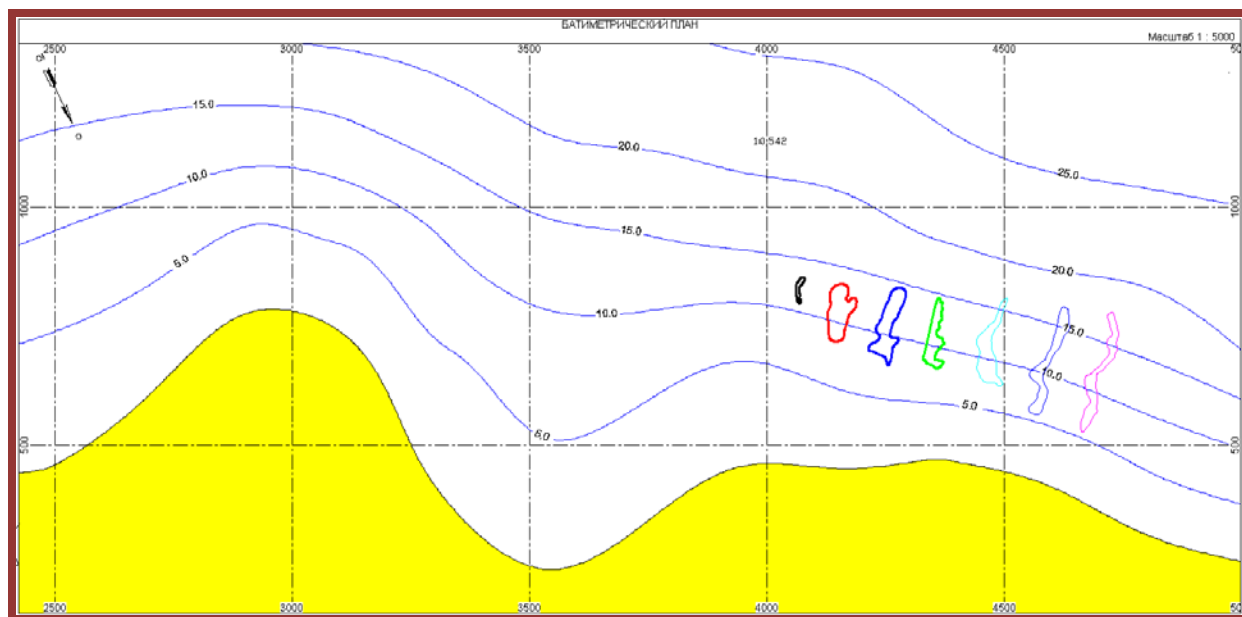


Рис. 7. Динамика разлива нефтепродукта в течение 3 часов по экспериментальным данным на отображении цифровой модели акватории

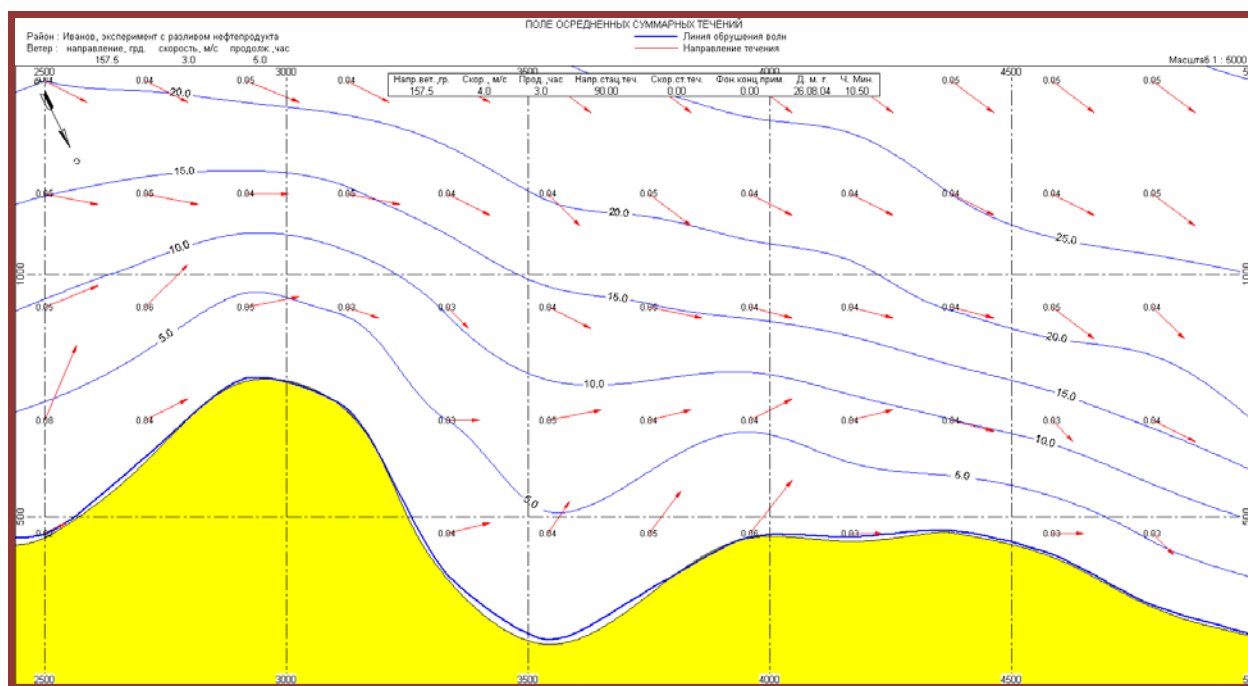


Рис. 8. Расчетное поле течений в прибрежной зоне моря при проведении эксперимента – ветер от ЮЮВ со скоростью 4 м/с

Результаты расчета динамики пятна нефтепродукта после калибровки модели приведены на рис. 9. На рис. 10 дано сопоставление результатов расчетов после калибровки модели с данными эксперимента.

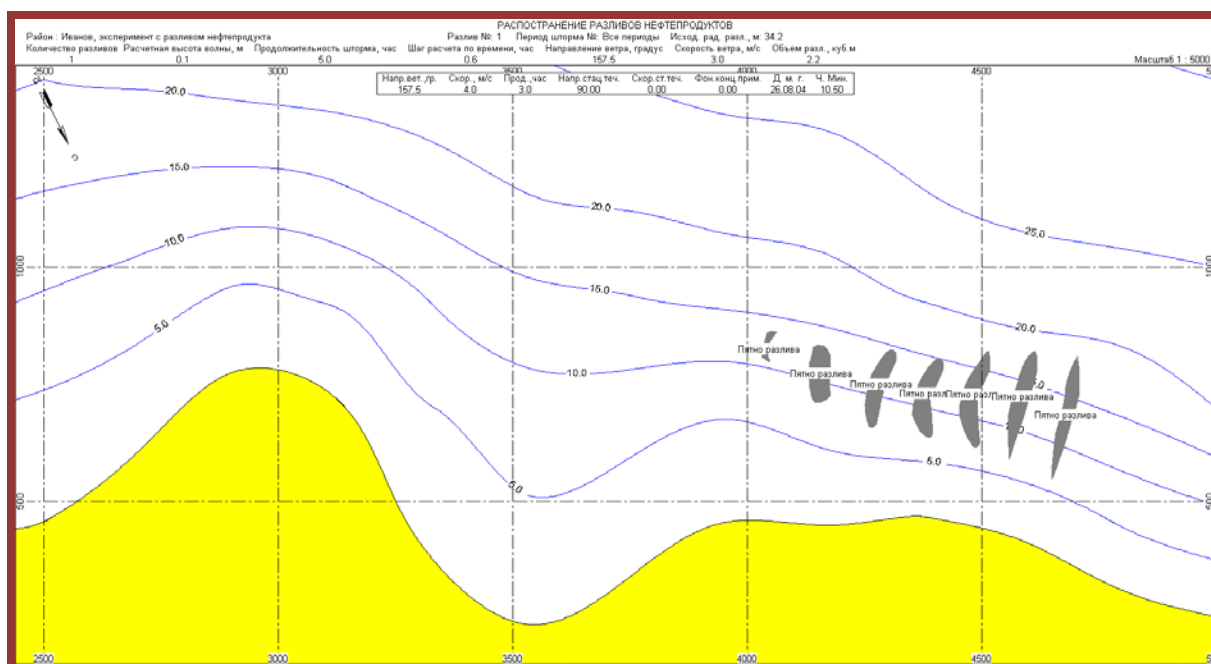


Рис. 9. Результаты расчета динамики разлива нефтепродукта после калибровки математической модели

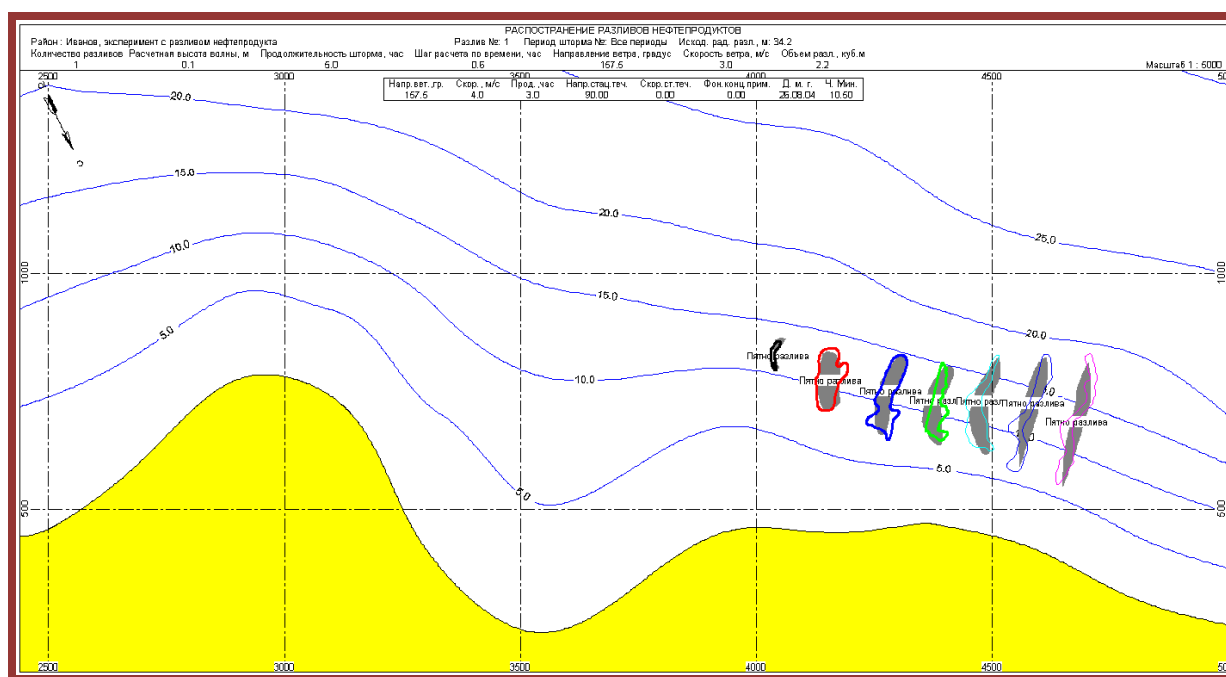


Рис. 10. Сопоставление результатов расчетов динамики нефтяного загрязнения с данными эксперимента

Из рис. 10 следует, что после калибровки модели результаты расчетов удовлетворительно соответствуют результатам эксперимента.

Таким образом, разработанная математическая модель динамики нефтяного пятна при аварийных разливах нефтепродуктов может быть использована для практических расчетов.

Примечания:

1. Смирнов Г.Н. Океанология: Учеб. для вузов. М.: Высш. шк., 1987.
2. Иванов А.В. Расчет течений прибрежной зоны моря // Строительство в прибрежных курортных регионах. Материалы 6-й международной научно-практической конференции, г. Сочи. 17–21 мая 2010 г. С. 139-141.
3. Руководство по морским гидрологическим прогнозам. СПб.: Гидрометеиздат, 1994.

Mathematical Model for Oil Products Pouring Dynamic

¹Alexander V. Ivanov

²Konstantin N. Makarov

¹Sochi State University, Russia
26a, Sovetskaya st., Sochi, 354000
PhD student

E-mail: shurik-2003@mail.ru

²Sochi State University, Russia
26a, Sovetskaya st., Sochi, 354000
Dr. (Technical), Professor
E-mail: ktk99@mail.ru

Abstract. The article deals with mathematical model of sea coastline pollution by oil products. This model features the basic process of oil spillage and consecutive oil spill drift. The model calibration is performed on the basis of real experiment.

Keywords: oil spillage, sea coastline, flow field, real experiment, mathematical model calibration.

UDC 502.3
