

УДК 528.88:504

**РИСКОВОЕ КАРТИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ШЕЛЬФА
КАСПИЙСКОГО МОРЯ ПРИ АВАРИЙНОМ РАЗЛИВЕ НЕФТИ**

Канд. техн. наук	Л.А. Балакай
Канд. техн. наук	Т.В. Дедова
Доктор техн. наук	Э.А. Закарин
Доктор техн. наук	Б.М. Миркаримова
	Н.Б. Тусеева

Разработана методика рискованного картирования загрязнения окружающей среды. Методика основана на риск-анализе процессов переноса и трансформации загрязняющих море веществ в пространстве вероятных метеоситуаций и соответствующей гидродинамики моря. В качестве примера рассматривается гипотетический случай аварийного разлива нефти вблизи месторождения Кашаган.

1 Основные положения теории риска

Основная особенность реакции окружающей среды на антропогенные воздействия – это неопределенность. Она может проистекать от неопределенности воздействий, но основной источник – это стохастический характер природных процессов и вытекающая отсюда неопределенность отклика системы на внешние факторы. Вследствие этого теория экологического риска опирается на основные положения теории вероятностей и рассматривает вероятностный отклик окружающей среды на антропогенные воздействия [9, 3]. В основе ее лежат понятия риска, меры и цены риска.

В терминах теории множества задачу можно сформулировать следующим образом. Пусть S – это множество состояний среды, D – множество возможных антропогенных воздействий на окружающую среду, в том числе аварий, R – множество всевозможных результатов. Состояние среды является, как правило, неопределенным, и описывается в рамках теории риска какой-либо вероятностной моделью: т.е. на S задается вероятностное распределение в виде подмножества s . Посредством отображения M оно при каждом воздействии d из D порождает распределение r на R . И, как следствие, каждому воздействию d соответствует свое распределение r на множестве результатов R . Распределение r в теории риска несет смы-

словую нагрузку риска и в зависимости от цели задачи может быть охарактеризовано мерой риска.

Математическая модель рассматриваемой ситуации есть отображение $M: S \times D \Rightarrow R$, сопоставляющее состоянию среды s и воздействию d на результат $r = M(s, d)$. Отметим, что для ранжирования риска необходимо задать некий порядок на множестве распределений, так называемое «отношение предпочтения».

Таким образом, основные проблемы при решении конкретных задач заключаются в следующем:

1. Построить модель неопределенности окружающей среды;
2. Определить вероятностное распределение (риски) на множестве результатов;
3. Выбрать меру риска, отражающую отношение предпочтения в соответствии с принятыми стандартами охраны окружающей среды.

2 Построение модели неопределенности окружающей среды

Сформулируем алгоритм (модель) генерации вероятностной реакции моря на аварийный разлив нефти. Из всех возможных факторов, порождающих неопределенности, выберем фактор, вызывающий наибольший практический интерес. Как правило, при анализе возможных последствий аварий рассматривают, в основном, неопределенность, связанную с моментом аварии. Поэтому в качестве фактора неопределенности будем использовать набор метеорологических ситуаций [8], относящийся к определенному, например, весеннему периоду времени. Серия расчетов на множестве этих ситуаций обеспечит вероятностное пространство, являющееся моделью неопределенности окружающей среды.

Расчеты выполнялись по моделям MIKE 21 HD (моделирование гидродинамики Каспия) и MIKE 21 SA (моделирование распространения нефтяного разлива). Не приводя громоздкие уравнения и их численную аппроксимацию, укажем только, что течения Северного Каспия описываются уравнениями в приближении мелкой воды, что соответствует реальным условиям.

Перенос загрязнителя в водной среде рассматривается как перемещение большого числа дискретных частиц по случайной траектории, т.е. смещение каждой частицы вычисляется как сумма адвективного детерминированного компонента и независимой случайной флуктуации типа Марковского процесса. Такой подход называется методом дискретных частиц Лагранжа. При попадании частицы в водную среду ее траектория и масса

записываются, как функция от времени относительно фиксированной в пространстве расчетной сетки. Движение каждой частицы сопровождается такими физико-химическими процессами, как адвекция, растекание, естественная дисперсия, испарение, формирование эмульсий и др. Плотность распределения всех частиц интерпретируется, как концентрация загрязняющего вещества в узлах расчетной сетки C_{ij} , где (i, j) – указанная расчетная сетка (грид) в x и y направлениях.

Для формирования вероятностного пространства использовались данные, полученные из Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды ECMWF (European Centre for Medium – Range Weather Forecasts) и относящиеся к трем весенним месяцам 2005 года. В соответствии с принятым в этом центре форматом весь период был разбит на отрезки в 120 часов, и каждый отрезок рассматривался как конкретная метеоситуация. Тем самым были сформированы еще два измерения: по времени внутри 120-ти часового отрезка и по числу метеоситуаций.

Таким образом, многовариантные расчеты по распространению и трансформации аварийного разлива нефти дали возможность сформировать множество C_{ijk}^s , где $i = 1, 2, \dots, N_i$ – номер расчетной ячейки в x – направлении, $j = 1, 2, \dots, N_j$ – номер расчетной ячейки в y – направлении, $k = 1, 2, \dots, N_k$ – номер временного слоя, $s = 1, 2, \dots, N_s$ – номер метеорологической ситуации. Концентрация загрязняющего вещества в каждой точке этого 4-х мерного пространства C_{ijk}^s играет роль случайной величины и будем в дальнейшем обозначать ее через X .

Для получения вероятностных полей введем классификацию степени риска («отношение предпочтения»), представленную ниже (табл. 1).

Таблица 1

Классификация степени риска

Номер класса v	1	2	...	N_v
Интервал	$X \geq A_1$	$A_1 \geq X \geq A_2$...	$A_{N_{v-1}} \geq X \geq A_{N_v}$

К сожалению, нормативных документов по оценке экологического риска не существует, поэтому величины A_v и число классов N_v часто выбираются произвольно. Наиболее разумный подход – это учет баланса интересов, т.е. эти критерии не должны тормозить развитие производства и учитывать проблему охраны окружающей среды, например, в форме оплаты эко-

логического ущерба. Однако на практике выбирают такую классификацию, которая соответствует интересам заказчика или принятым нормативам.

Введем понятие вероятности для данной задачи:

$$(P_{ij})_v (A_{v-1} > X \geq A_v) = \frac{(f_{ij})_v}{N_k N_s}, \quad (1)$$

где $(f_{ij})_v$ – повторяемость попадания случайной величины X (здесь концентрации загрязнителя в ячейке грида) в v -ый класс. Как видно из уравнения (1), вероятность $(P_{ij})_v$ рассчитывается с помощью нормировки повторяемости на число испытаний и представляет собой совокупность (по ячейкам грида) вероятностных распределений, порождаемых решениями.

Таким образом, формула (1) определяет модель неопределенности окружающей среды, формируемая путем многократного решения прямой задачи в пространстве характерных для заданного периода метеорологических ситуаций.

3 Построение карты экологических рисков

Следующей задачей является построение алгоритма картирования экологических рисков, порождаемых возможной аварией с выбросами (разливами) загрязняющих веществ. Для этого необходимо ввести понятие меры риска. Имеются различные варианты определения мер риска [14, 15] – математическое ожидание, дисперсия (среднеквадратичное отклонение), мера ожидания полезности, мера возмущенной вероятности, VaR (Value at Risk) и др. Исходя из соображения наибольшей информативности, будем оперировать двумя критериями, математическим ожиданием и риском превышения предельно-допустимых концентраций или других санитарных норм.

Математическое ожидание для данной задачи определяется для каждой ячейки как вероятностное среднее:

$$M_{ij} = \sum_{v=1}^{N_v} (P_{ij})_v \cdot (C_{ij})_v. \quad (2)$$

Распределение M_{ij} определяет карту рисков различного уровня загрязнения заданной территории.

При анализе этой карты применим указанную выше качественную шкалу – «очень плохо», «плохо», «средне», «хорошо» и «очень хорошо», причем априори примем, что в ближайшей окрестности места аварии реализуется состояние «очень плохо».

Анализ риска по осредненным данным дополним картированием риска превышения санитарных норм. Это можно осуществить с помощью расчета вероятности превышения санитарной нормы A^* с масштабированием к максимальной величине (100% вероятность):

$$(R_{ij})^* = \frac{(P_{ij})^*(X \geq A^*)}{\max(R_{ij})^*} \cdot 100\% . \quad (3)$$

Таким образом, карты величин M_{ij} и $(R_{ij})^*$ обеспечат качественную и количественную оценки меры риска загрязнения окружающей среды вследствие аварийного выброса или разлива загрязняющих веществ. Следует подчеркнуть, что эти величины принципиально отличаются друг от друга. Первая характеризует риск загрязнения по всем классам, в то время как вторая – вероятность повторяемости высокого уровня загрязнения водной среды.

4 Рисковое картирование нефтяного загрязнения моря

Наиболее опасным для прибрежных зон техногенным воздействием является аварийные разливы нефти. Особенно высок риск таких происшествий в районах, где расположены затопленные и плохо законсервированные скважины, ведется промысел нефти или ее транспортировка [1]. Разливы нефти, утечка нефтепродуктов могут привести к ухудшению экологической ситуации не только в районе разлива, но и близлежащих районах. При этом тип берега и местные климатические условия определяют поведение нефтяного пятна и степень его воздействия на окружающую территорию. В соответствии с международными рекомендациями, карты чувствительности являются составной частью любого плана на случай ликвидации разлива нефти. Таким образом, карты рисков зон нефтяного загрязнения представляют собой информационную среду, позволяющую оперативно определять приоритеты при ликвидации разливов, моделировать и прогнозировать процесс, связанный с разливами нефти, а также оценивать предварительный ущерб, нанесенный в результате выбросов нефти на побережье.

Применим разработанный алгоритм к задаче нефтяного загрязнения моря при аварии на трубопроводе, проложенном по морскому дну Северного Каспия. Для определенности предположим, что авария произошла на морском участке некоего трубопровода, проложенного от месторождения на шельфе моря до нефтеперерабатывающего завода на берегу. Расчет количества нефти, вылившейся в результате аварии, выполним по методи-

ке ПНГ «ЭКОЛОГ» [4]. Параметры трубопровода и места аварии зададим произвольно, ориентируясь на мощность среднего внутрипромыслового нефтепровода (см. Рис. 1).

Расчет риска загрязнения морской поверхности при аварии на нефтепроводе

Координаты точки повреждения X, Y, Z (UTM 39, WGS 84) 606283,5166007,-32

Координаты насосной станции, расп. слева от аварии 597018,5142375,-27

Координаты насосной станции, расп. справа от аварии 611314,5234215,-25

Координаты задвижки 1 604869,5156879,-31.3

Координаты задвижки 2 607045,5167643,-30.3

Координаты точки перелома 1 602320,5147976,-32.8

Координаты точки перелома 2 609773,5181720,-29

Координаты точки перелома 3 616994,5194664,-28

Координаты точки перелома 4 613284,5199826,-28

Координаты точки перелома 5

Квартал разлива нефти
 I квартал 2005г. III квартал 2005г.
 II квартал 2005г. IV квартал 2005г.

Глубина заложения нефтепровода, [м] 1.8

Внутренний диаметр нефтепровода, [м] 0.7112

Форма и размеры разрыва трубы круг 0.5

Расход нефти на поврежденном участке, [м3/ч]

Давление в начале участка, [Па] 6000000

Давление в конце участка, [Па] 1400000

Расход нефти в исправном нефтепроводе, [м3/ч] 2917.17

Физические и химические свойства нефти			
N фракции	Описание	Температура кипения	%
1	C6 - C12(Paraffin)	069 - 230 °C	25.09
2	C13 - C25(Paraffin)	230 - 405 °C	11.93
3	C6 - C12(Cycloparaffin)	070 - 230 °C	10.31
4	C13 - C23(Cycloparaffin)	230 - 405 °C	7.95
5	C6 - C11(Paraffin)	080 - 240 °C	5.28
6	C12 - C18(Paraffin)	240 - 400 °C	19.88
7	C9 - C25(Paraffin)	180 - 400 °C	9.56
8	Residual (incl. heterocycles)	>400 °C	10

Относительная температура °C 10

Вязкость при относительной температуре (сст) 3.66

Температура нефти °C 41

Плотность нефти, т/м3 0.9

Рис. 1. Входные параметры модели расчета рисков, связанных с аварией на нефтепроводе.

Классификацию по загрязнению поверхности моря выполним согласно табл. 2 [10]. Из сопоставления табл. 1 и табл. 2 видно, что $A_1 = 0,2$ мм, $A_2 = 0,05$ мм, $A_3 = 0,005$ мм, $A_4 = 0,0003$ мм, $A_5 = 0,00004$ мм. В качестве санитарной нормы выберем минимальную толщину $A^* = 0,005$, при которой нефтяная пленка может быть еще обнаружена по данным космической радиолокационной съемки.

Классификация загрязнения нефтью поверхности моря

№ класса	Толщина нефтяной пленки, мм	Описание
1	0,2 и более	Пятно нефтяного цвета с четкими границами
2	0,05...0,2	Разрывное пятно нефтяного цвета
3	0,005...0,05	Металлическая пленка
4	0,0003...0,005	Радужная пленка
5	0,00004...0,0003	Тонкая пленка (серое пятно)

Технология расчета включает следующим этапы:

1. Формирование пакетов метеоситуаций с заблаговременностью 120 часов, относящихся к выбранному периоду времени (здесь – второму кварталу 2005 года). Метеополя в период указанных метеоситуаций меняются 4 раза в сутки.
2. Создание базы данных температуры воздуха и воды Северного Каспия (<http://cliware.meteo.ru/izotpp>; <http://hmc.hydromet.ru/sea>).
3. Многократный расчет динамики течений по модели MIKE 21 в модуле HD [12, 13], используя адаптированную к условиям Каспия методику [2, 7]. Формирование пакета морских и воздушных течений;
4. Расчет массы нефти, вылившейся в толщу воды по методике ПНГ «ЭКОЛОГ» [4];
5. Многократный расчет нефтяного загрязнения моря по модели MIKE 21 в модуле SA [11] для всего пакета морских и воздушных течений;
6. Конвертирование результатов моделирования нефтяного загрязнения моря с помощью инструментов MIKE Zero в точечные shp-файлы;
7. Преобразование полученных наборов shp-файлов в грид-формат с помощью инструментов ArcInfo Workstation и формирование матрицы C_{ijk}^s ;
8. Расчет математического ожидания M_{ij} с помощью функций и процедур ArcInfo Workstation и построение соответствующей карты;
9. Расчет полей риска $(R_{ij})^*$ загрязнения моря нефтяной пленкой с помощью функций и процедур ArcInfo Workstation, толщина которой не меньше 0,005 мм и построение соответствующей карты риска.

Рис. 2 иллюстрирует результат качественного анализа риска загрязнения моря. Расчет показал, что в результате аварии на нефтепроводе риску загрязнения будет подвержена территория порядка 590 км². С наибольшей вероятностью для заданного периода (2 квартал 2005 г.) нефть будет распространяться в северо-восточном направлении, и территория площадью порядка 16 км² будет подвержена высокому риску загрязнения. Территория размером 118 км², расположенная северо-восточнее и юго-

западнее от места аварии, будет подвержена риску загрязнения нефтью со средней степенью вероятности.



Рис. 2. Степень риска нефтяного загрязнения моря при аварии на нефтепроводе.



Рис. 3. Риск загрязнения моря нефтяной пленкой толщиной более 0,005 мм.

Рис. 3 демонстрирует результаты расчета полей риска загрязнения моря нефтяной пленкой, толщина которой более 0,005 мм. Расчеты показали, что нефтяная пленка указанной толщины распространится на 20 км в северо-восточном и юго-западном направлениях относительно источника загрязнения. Распространение нефтяной пленки в северо-западном и юго-

восточном направлениях составляет около 10 км. Кроме того, с вероятностью 11...20 % нефтяные пятна будут распространяться в западном направлении на расстояние 70 км и в северо-восточном направлении на расстояние 35 км. С вероятностью около 80 % нефтяное пятно толщиной более 0,005 мм переместиться от места аварии на расстояние 8 км в северо-восточном направлении.

Таким образом, разработана методика расчета и картирования рисков загрязнения окружающей среды при авариях на нефтепроводах. Методика предполагает построение модели неопределенности отклика окружающей среды на антропогенное воздействие путем многократного расчета прямой задачи на фоне большого набора полей метеозащитных элементов, характерных для выбранного периода времени. Результирующее множество полей концентрации загрязнителя используется для расчета различных мер риска и их картирования для конкретной территории. Методика может получить дальнейшее развитие, если полученные карты риска обработать совместно с картами проживания населения и картами распределения других экологически чувствительных биологических сообществ. Таким путем можно оценить риски неблагоприятного воздействия аварии на человека и биоту.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Закарин Э.А., Кипшакбаев А.И., Мухамедгалиев А.Ф. Мониторинг и моделирование территориальных процессов Северного Каспия. – Алматы: Гылым, 2003. – 170 с.
2. Йенсен Х.Р., Ивкина Н.И., Строева Т.П. Некоторые результаты тестирования системы предупреждения штормовых нагонов на Каспийском море // Гидрометеорология и экология. – 2002. – №1. – С. 93-100.
3. Оценка риска при анализе функционирования нефтегазопроводов и их взаимодействия с окружающей природной средой. // «Энергия». Тбилиси. 2002. №1(21), С. 3-13.
4. Программа расчета выбросов вредных веществ при авариях на нефтепроводах «АВАРИИ НА НЕФТЕПРОВОДАХ», фирма "Интеграл", г. Санкт-Петербург, согласованная с ГГО им. Воейкова.
5. Шиварева С.П., Ивкина Н.И., Строева Т.П., Васенина Е.И. Расчет ветровых нагонов на казахстанском побережье Каспийского моря на основе модели MIKE 21 / Сб. докладов международного научного семинара по экологическим проблемам прикаспийского региона. – М.: 2000. – С. 14-16.
6. Buhlmann Hans Mathematical Methods in Risk Theory. Springer, Berlin, 1970.

7. Dr. Olaf Trieschmann. How to detect oil spills? Workshop - Satellite Monitoring and Assessment of Sea-based Oil Pollution in the Black Sea. 15 June 2005.
8. Mahura, A. Baklanov, J. H. Sorensen. Methodology for evaluation of possible consequences of accidental atmospheric releases of hazardous matter// Radiation Protection Dosimetry Journal, February 2002, PP. 1-8.
9. MIKE 21 & MIKE 3 PA/SA. Particle Analysis and Oil Spill Analysis Module. User Guide. DHI Software 2005. P 106.
10. MIKE 21 Flow Model. Hydrodynamic module. Scientific Documentation. DHI Software 2005. P 58.
11. MIKE 21 Flow Model. Hydrodynamic module. User Guide. DHI Software 2005. P 90.
12. Wang S. Premium calculation by transforming the layer premium density. ASTIN Bulletin, 26, 1996, pp. 71 – 92.
13. Young V.P. Discussion of Christofides' Conjecture Regarding Wang's Premium Principle. ASTIN Bulletin, 29, 2, 1999, pp. 191 – 195.

Казгеокосмос, г. Алматы

КАСПИЙ ТЕҢІЗІ ҚАЙРАҢЫН МҰНАЙДЫҢ АПАТТЫҚ ТӨГІЛУІ КЕЗІНДЕГІ ЛАСТАНУЫНЫҢ ТӘУЕКЕЛДІЛІК КАРТАЛАУ

Техн. ғылымд. канд.	Л.А. Балакай
Техн. ғылымд. канд.	Т.В. Дедова
Техн. ғылымд. докторы	Э.А. Закарин
Техн. ғылымд. докторы	Б.М. Миркаримова
	Н.Б. Тусеева

Қоршаған ортаның ластануының тәуекелді карталау әдістемесі дамытылады. Бұл әдістеме ықтимал метеожаздайлар мен тиісті теңіз гидродинамикасы кеңістігінде теңізді ластаушы заттардың трансформациясы мен тасымалдану процестерінің тәуекел – талдауына негізделеді. Мысал ретінде Қашаған кенорны маңында гипотезалық апат жағдайы қарастырылады.