

Математическое моделирование экологических рисков загрязнения вод океанов и морей на основе теории сопряженных уравнений

Заячковский Антон Олегович

МГУ им. М. В. Ломоносова

Выездной семинар-школа «Состояние и перспективы мониторинга Мирового океана и морей России по данным дистанционного зондирования и результатам математического моделирования»

1 Элементы теории риска

1.1 Управление рисками как инструмент теории принятия решений

1.2 Понятие риска и факторы, влияющие на величину риска

1.3 Формальное описание риска

1.4 Оценка рисков

2 Оценка уязвимости территории

2.1 Математическая теория расчета уязвимости территории

2.2 Алгоритм вычисления величины экологической опасности

3 Оценка ущерба, связанного с аварийным выбросом загрязняющего вещества в поверхностные воды

3.1 Подсчет величины штрафов

3.2 Оценка затрат на реабилитацию загрязненной области

4 Оценка экологического риска для различных прибрежных зон Индийского океана

4.1 Численная реализация алгоритма

4.2 Тестовые расчеты

Заключение

Литература

Теория принятия решений и управление рисками

Принимать решения приходится во всех областях человеческой деятельности. В области экологии и охраны окружающей среды все чаще возникает необходимость в принятии сложных решений, последствия которых бывают очень весомы. В связи с этим появляется потребность в руководстве по принятию решений, которые упрощали бы этот процесс и придавали решениям большую достоверность. Центральную роль в рассмотрении проблемы принятия решений играет понятие риска [Королев В. Ю., Бенинг В. Е., Шоргин С. Я., 2007, Вишняков Я. Д., 2008].

Экологический риск

Для измерения риска используется подход, основанный на измерении убытков в неблагоприятной ситуации, когда показатель риска вычисляется из выражения [Ваганов П. А., 2001]:

$$\text{Показатель риска} \left[\frac{\text{Ущерб}}{\text{Время}} \right] = \text{Вероятность} \left[\frac{\text{События}}{\text{Время}} \right] \times \\ \times \text{Ожидаемый ущерб} \left[\frac{\text{Ущерб}}{\text{События}} \right].$$

$$R = P \cdot Q. \quad (1)$$

Оценка экологической опасности

Исходные положения и модель переноса

Распространение концентрации загрязняющего вещества (*поллютанта*) C происходит по части поверхности сферы D , поэтому используются сферические координаты $(\varphi, \theta, R_{\text{зем}})$, где $R_{\text{зем}}$ — радиус сферы, концентрация рассматривается в момент времени t и $C \equiv C(\varphi, \theta, t)$ в $D_T \equiv D \times (0, T)$ — область изменения пространственно-временных координат.

Будем рассматривать модель переноса загрязняющего вещества, основанного на полуэмпирическом уравнение турбулентной диффузии в дифференциально-операторной форме [Марчук Г. И., 1982]:

$$LC \equiv \frac{\partial C}{\partial t} + \nabla C - \nabla \cdot \mu \nabla C + \Lambda(C) = 0 \quad \text{в } D_T, \quad (2)$$

Начальное условие (*управление*) имеет вид $C(\varphi, \theta, 0) = C_0(\varphi, \theta)$, граничное — $C|_{\Gamma} = 0$.

Ситуации экологической опасности

Вводится функционал

$$\Phi(C) = \int_{D_T} C \cdot \chi(\varphi, \theta) dDdt, \quad (3)$$

показывающий степень экологической опасности для объекта получить загрязнения от действующих и потенциально возможных источников [Пененко В. В., 2004].

Нас интересует вероятность невыполнения неравенства

$$|\delta\Phi| < \Delta, \quad (4)$$

выражающего условия попадания изучаемой ситуации в категорию экологической опасности для рассмотренного случая:

$$P \equiv P(|\delta\Phi| \geq \Delta). \quad (5)$$

Величина экологической опасности

Утверждение: Величина экологической опасности при распространение пассивной примеси массой M от мгновенного точечного источника (поверхность акватории разбита на подобласти $\bigcup_i D_i = D$ (меры $\text{mes}(D_i)$), на которых задаются вероятности аварии как $P_i((\varphi, \theta) \in D_i)$) может быть вычислена по формуле

$$P(|\delta\Phi| \geq \Delta) = \sum_i \frac{\text{mes}(\hat{D}_i)}{\text{mes}(D_i)} P_i, \quad (6)$$

где $\hat{D}_i = \left\{ (\hat{\varphi}, \hat{\theta}) \in D_i : M \cdot C^*(\hat{\varphi}, \hat{\theta}) \Big|_{t=0} \geq \Delta \right\}$.

Здесь введена функция чувствительности $C^* \Big|_{t=0}$ как решение сопряженной задачи в D_T при $t = 0$:

$$\begin{cases} L^* C^* = \chi(\varphi, \theta) \\ C^*|_{\Gamma} = 0, \\ C^*(\varphi, \theta, T) = 0. \end{cases} \quad (7)$$

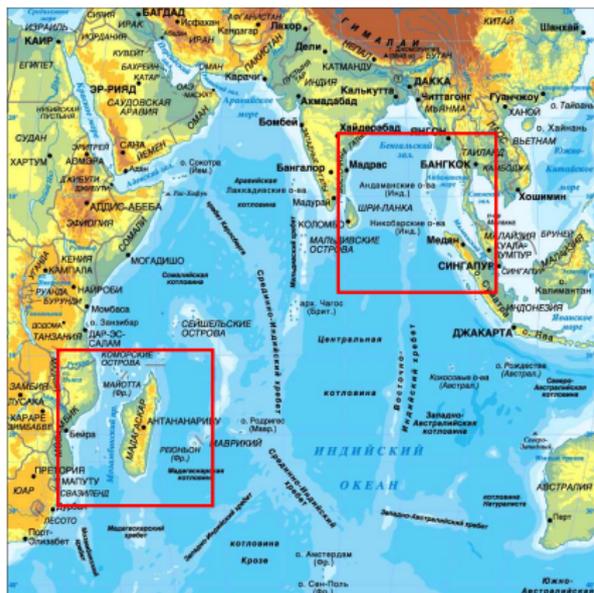
Расчет экологического ущерба

Для оценки ущерба (т. е. для оценки Q), связанного с аварийным выбросом загрязняющего вещества в поверхностные воды, используется *косвенный подход* к данной задаче, основанный на принципе перенесения на исследуемый объект общих закономерностей и параметризации негативных последствий от основных ущербобразующих факторов.

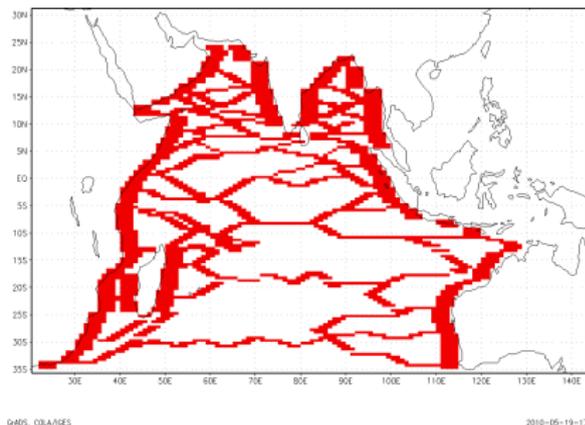
В настоящей работе показатель ущерба Q характеризует штрафы за нарушение санитарных норм и является разностью между штрафами за несанкционированный разлив загрязняющего вещества F и суммой, необходимой для реабилитации загрязненной области или объекта L :

$$Q \equiv F - L = K_{\text{эк}} \cdot K_{\text{и}} \cdot H_{\text{уд}} \cdot M - l \cdot K_{\text{тип}} \cdot \text{mes}(D). \quad (8)$$

Примеры расчетов на акватории Индийского океана

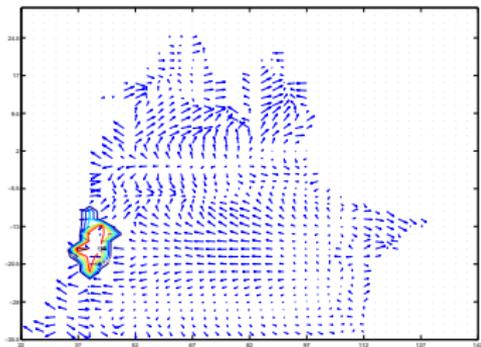


Прибрежные области



Торгово-промышленные пути

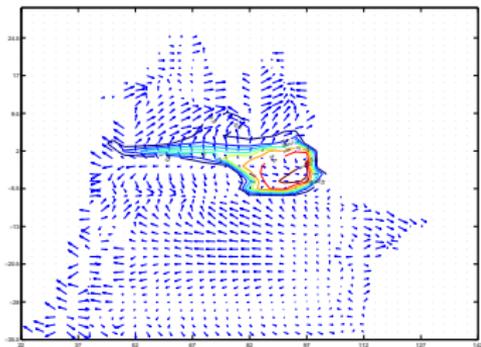
На примере Мадагаскара



Функция чувствительности

Интенсивность источника M (тыс. тонн)	Величина экологического ущерба R (тыс. долларов)
0.1	0.630267
0.5	4.147
1	8.84178
5	50.2667
10	105.238

На примере Никобарских островов



Функция чувствительности

Интенсивность источника M (тыс. тонн)	Величина экологического ущерба R (тыс. долларов)
0.1	0.0832802
0.5	0.49567
1	1.04355
5	5.73665
10	11.919

Спасибо за внимание

Результатом настоящей работы является разработка алгоритма моделирования распространения загрязняющего вещества и создание методики расчета экологических рисков с применением теории сопряженных уравнений, а также приложение разработанной методики для тестовых расчетов значения величины риска в акватории Индийского океана.

Технологии и результаты, представленные в настоящей работе, могут быть использованы природоохранными органами в целях осуществления государственного экологического контроля и аудита, а также аудиторскими и страховыми компаниями.

Выражаю благодарность научному руководителю д. ф.-м. н., профессору Агошкову В. И. за поддержку настоящей работы и ряд важных замечаний.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (коды проектов 09-01-12029-офи-м, 09-05-00421, 10-01-00806), программы ФЦП «Кадры» (НК-408Р-42, НК-421Р-67).