
СНИЖЕНИЕ РИСКОВ И ЛИКВИДАЦИЯ ПОСЛЕДСТВИЙ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ. ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ В ЧС

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СИТУАЦИЙ И ОПТИМИЗАЦИИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО УЛУЧШЕНИЮ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ В РАЙОНАХ С НЕФТЯНЫМ ЗАГРЯЗНЕНИЕМ НА ОСНОВЕ КОНЕЧНЫХ ЦЕПЕЙ МАРКОВА

И. В. Бардин;

Ю. Д. Моторыгин, кандидат технических наук, доцент;

М. А. Галишев, доктор технических наук, профессор.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России

Проведен сравнительный анализ регламентируемых параметров состояния почвенного покрова на объектах нефтегазового комплекса, основывающихся на предельно допустимых концентрациях и ориентировочно допустимых концентрациях нефтепродуктов в почвах, а также критерии экологической оценки территорий. Рассмотрены различные методы оценки масштабов ущерба, причиняемого природной среде за счет нефтяного загрязнения. Предложен алгоритм принятия решений по оптимизации материальных затрат, направленных на предупреждение и ликвидацию чрезвычайных ситуаций. Предложенная математическая модель основана на теории конечных цепей Маркова.

Ключевые слова: природная среда, экология, нефтяное загрязнение, конечные цепи Маркова

FORECASTING OF SITUATIONS AND OPTIMIZATION OF DECISION- MAKING ON IMPROVEMENT OF ECOLOGICAL CONDITIONS IN AREAS WITH OIL POLLUTION ON THE BASIS OF FINITE MARKOV CHAINS

I. V. Bardin; J. D. Motorygin; M. A. Galishev. Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia

In work the comparative analysis of regulated parameters of a condition of a soil cover on the objects of an oil-and-gas complex which are based maximum permissible concentration and roughly admissible concentration of mineral oil in bedrock, and also criterion of an ecological estimation of territories is lead. Various methods of an estimation of scales of the damage, caused to an environment due to oil pollution are examined. The algorithm of decision-making on optimization of the material inputs directed on the prevention and liquidation of extreme situations Is offered. The offered mathematical model is based on the theory of finite Markov chains.

Key words: environment, ecology, oil pollution, finite Markov chains

Природоохранным законодательством, прежде всего федеральными законами «Об охране окружающей среды» [1], «Об экологической экспертизе» [2], подзаконными актами об оценках воздействия на окружающую среду (ОВОС) и т. д., закреплены методы экономического регулирования и правовые механизмы охраны окружающей среды: нормирование в области охраны окружающей среды; лицензирование обращения с опасными отходами; экосертификация; экострахование; экоаудит; ОВОС; экоэкспертиза (государственная и общественная); общие экологические требования; создание особо охраняемых природных территорий; государственный экологический мониторинг; экоконтроль (государственный, производственный, муниципальный, общественный); государственный учет объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду; ответственность за нарушение законодательства в области охраны окружающей среды.

Систематическое применение перечисленных методов экономического регулирования и правовых механизмов составляет содержание отдельных видов деятельности в области охраны окружающей среды.

Постановлением Правительства РФ от 13 сентября 1996 г. № 1094 введена классификация ЧС природного и техногенного характера в зависимости от количества пострадавших, величины материального ущерба, зоны распространения поражающих факторов. Классифицирующие признаки ЧС в виде количества разлившейся нефти и нефтепродуктов введены постановлениями Правительства РФ от 21 августа 2000 г. № 613, от 16 апреля 2002 г. № 240. Приказом МПР РФ от 3 марта 2003 г. № 156 определен нижний уровень разлива нефти и нефтепродуктов для отнесения аварийного разлива нефти к ЧС.

Под антропогенным воздействием в общем случае понимается любой вид хозяйственной деятельности человека, оказывающий влияние на природную среду. Количественной мерой допустимого антропогенного воздействия, как правило, служит уровень того или иного физического поля. Например, при химическом загрязнении – предельно допустимая концентрация (ПДК) вредных веществ. Установлены, в частности, ПДК для некоторых углеводородных соединений в почвах: бензол – 0,3; бенз(а)пирен – 0,02; толуол – 0,3; ксилолы – 0,3; а также для топливного бензина – 0,3 мг/кг воздушно-сухой почвы [3].

Согласно показателям уровней загрязнения земель, основывающимся на предельно допустимых концентрациях нефтепродуктов к безопасному уровню загрязнения относятся земли с содержанием нефтепродуктов менее 1000 мг/кг (табл. 1) [4].

Таблица 1. Показатели уровней загрязнения земель по содержанию в них нефтепродуктов, мг/к (в скобках – значения ПДК для почв)

Вид загрязнения	Уровни загрязнения				
	1-й – допустимый	2-й – низкий	3-й – средний	4-й – высокий	5-й – очень высокий
Циклогексан	< ПДК	от ПДК до 6	от 6 до 30	от 30 до 60	> 60
Бензол	< ПДК (0,3)	от ПДК до 1	от 1 до 3	от 3 до 10	> 10
Толуол	< ПДК (0,3)	от ПДК до 10	от 10 до 50	от 50 до 100	> 100
Ксилолы	< ПДК (0,3)	от ПДК до 3	от 3 до 30	от 30 до 100	> 100
Бенз(а)пирен	< ПДК (0,02)	от ПДК до 0,1	от 0,1 до 0,25	от 0,25 до 0,5	> 0,5
Нефть и нефтепродукты	< 1000	от 1000 до 2000	от 2000 до 3000	от 3000 до 5000	> 5000

В настоящее время проведена работа по нормированию содержаний нефти и нефтепродуктов в почвах России, результатом которой явилось установление ориентировочно допустимых концентраций (ОДК) этих загрязнителей в почвах [5]. По оценкам, основанным на ориентировочных допустимых концентрациях содержания нефти и нефтепродуктов в почвах, предлагается считать нижним допустимым уровнем загрязнения такой, при котором в данных природных условиях почва в течение одного года восстанавливает свою продуктивность, а негативные последствия для почвенного биоценоза могут быть самопроизвольно ликвидированы.

По этим же оценкам устанавливают верхний допустимый уровень содержания нефтепродуктов в почвах, выше которого процессы самоочищения резко замедляются, и почва сама не может справиться с загрязнением. Этот уровень называют также пределом потенциала самоочищения. Почвы, содержащие нефтепродукты выше верхнего допустимого уровня, самостоятельно не выйдут из стадии деградации и будут оказывать устойчивое негативное воздействие на контактирующие с ними компоненты природной среды.

В зависимости от масштаба нефтяного разлива степень нарушений элементов окружающей среды может быть различной – вплоть до ЧС. При выявлении зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия по степени химического загрязнения нефтепродуктами руководствуются, в частности, следующими критериями (табл. 2) [6].

Таблица 2. Критерии экологической оценки территорий по содержанию в почвах нефтепродуктов (в единицах ПДК)

Показатель	Экологическое бедствие	Чрезвычайная экологическая ситуация	Относительно удовлетворительный
Химические вещества 1 класса опасности (включая бенз(а)пирен)	> 3	2-3	< 1
Химические вещества 3 класса опасности (включая нефть и нефтепродукты)	> 20	10-20	< 1

Нормативы контроля природопользования становятся с каждым годом все жестче, соответственно возрастают размеры штрафов.

В процессе добычи углеводородного сырья ущерб наносится практически всем элементам ОС. В связи с этим возникает необходимость разработки механизмов компенсации наносимого ущерба. Для этого требуется оценить его масштабы. Ущерб, причиняемый природной среде за счет ее загрязнения, определяется исходя из объемов поступающих в ОС загрязняющих веществ и характеристик реципиентов («получателей» ущерба). Денежная оценка негативных изменений в ОС формирует величину экономического ущерба. На сегодня существуют различные подходы к определению величины ущерба, но важными составляющими элементами расчетов по всем методикам являются сбор данных о составе и объеме выбросов, а также определение области распространения выбросов (зон загрязнения) [7].

Метод контрольных районов основан на сопоставлении результатов загрязнения в контрольном (условно чистом) и рассматриваемом районах. Его применяют только для фактической оценки материального ущерба при имеющейся нагрузке на ОС. Это основной метод определения значений удельных ущербов.

В основе метода контрольных районов – выбор района, по всем параметрам (климат, топология и др.) совпадающего с исследуемым. Этот контрольный, эталонный район должен отличаться лишь уровнем антропогенной нагрузки на окружающую природную среду (ОПС). Идеальный контрольный район – тот же самый район до ввода в эксплуатацию объекта,

оказывающего негативное воздействие. При определении ущерба этим методом сопоставляются уровни загрязненности контрольного и исследуемого районов.

Аналитический метод основывается на использовании многофакторного анализа взаимосвязей отдельных показателей реципиентов и уровня загрязнения. Расчет ущерба по этому методу предполагает использование большого массива информации об антропогенной нагрузке и соответствующих (подвергающихся воздействию) характеристиках объектов-реципиентов. По итогам моделирования (регрессионный, корреляционный и другие виды анализа) получают значения удельных ущербов.

Комбинированный метод используется в случаях, когда число факторов воздействия очень велико и вклад каждого из них в формирование ущерба определить затруднительно. Например, *эмпирический метод* – комбинация метода контрольных районов и аналитического метода. На основе зависимостей, полученных в аналитическом методе и методе контрольных районов, даются характеристики ущербов на исследуемых объектах. В результате создаются методики, в основе которых лежат эмпирические оценки удельных ущербов.

Особенностью метода контрольных районов и аналитического метода является необходимость сбора большого количества информации о загрязнениях и состоянии объектов-реципиентов. В эмпирическом методе оценка ущерба проводится на основе концентраций загрязняющих веществ (т.е. по отдельным ингредиентам) или на основе оценки валовых выбросов (сбросов) загрязняющих веществ. Основная проблема, которая возникает при этом – это сложность четкого определения вклада конкретного загрязнителя (загрязняющего вещества либо источника загрязнения) и расчета наносимого им ущерба.

В связи с тем, что расчеты ущерба с использованием метода контрольных районов и эмпирического метода являются довольно трудоемкими, на практике в расчетах, не требующих большой точности, используются *укрупненные методики* определения экономического ущерба, основанные на валовых выбросах загрязняющих веществ [8].

В настоящей работе предлагается методика, позволяющая объединить экономические оценки с возможностью прогнозирования ситуации и оптимизации принятия решений для улучшения экологической обстановки в районах, потенциально подверженных нефтяным загрязнениям. Для реализации указанной методики используется математическое моделирование. Простотой и ясностью физического смысла отличаются модели, основанные на теории конечных цепей Маркова.

Цепь Маркова – последовательность случайных событий с конечным или бесконечным числом исходов, характеризующаяся тем свойством, что при фиксированном настоящем будущее независимо от прошлого, которое сформировало данное настоящее [9].

Конечной цепью Маркова называется процесс, который переходит из состояния в состояние с определенной вероятностью, так называемой вероятностью перехода. Число этих состояний конечно, а значение вероятности перехода полностью определено состоянием, в котором процесс находится в данный момент времени, то есть вероятность перехода является условной.

Для примера в качестве возможных состояний приняты три степени загрязнения почвы нефтепродуктами, отвечающие следующим критериям экологической оценки [6] (см. табл. 2).

1. Относительно удовлетворительный, с содержанием нефтепродуктов в почве менее ПДК.
2. Наличие нефтяного загрязнения, не создающего ЧС, с содержанием нефтепродуктов в почвах от ПДК до 10 ПДК.
3. Чрезвычайная экологическая ситуация, с содержанием нефтепродуктов в почве от 10 до 20 ПДК.

Почва в качестве элемента окружающей среды выбрана на том основании, что она является доминирующим элементом любой экосистемы. Почвы, являясь важнейшим звеном биогеохимического круговорота веществ в экосистемах, источником поступления этих веществ в растительность и по трофическим цепям в организм человека, являются и важнейшим

объектом экологических исследований при оценках антропогенного воздействия. Почвы аккумулируют загрязнители в течение длительного периода, а их химический состав дает интегральную характеристику долговременного загрязнения – его масштабов и превращений в зависимости от видового состава почв и их способности к самоограничению.

Рассмотрим следующие ситуации или исходы процесса.

1. Почва, находясь изначально в первом (относительно удовлетворительном) состоянии, в следующем периоде наблюдений останется в том же состоянии.

2. В результате разливов нефтепродуктов почва перейдет во второе состояние с нефтяным загрязнением без создания ЧС.

3. Состояние почвы ухудшится до создания ЧС (третье состояние).

Фактические значения вероятностей возникновения того или иного состояния в соответствии с площадью, глубиной загрязнения земель, концентрацией нефти (нефтепродуктов) определяются на основании данных по обследованию земель и лабораторных анализов, проведенных в соответствии с нормативными и методическими документами, утвержденными или разрешенными для применения государственными органами. Площадь нефтяного загрязнения земель и водных объектов может быть определена с помощью экспертных оценок, инструментальными методами, методом аэрофотосъемки, то есть с применением всего арсенала методов экологического мониторинга.

Рассмотрим марковскую цепь событий, состоящую из трех состояний, – S1, S2 и S3. Поскольку других исходов процесса нет, то $S_1+S_2+S_3=1$.

Тогда процесс перехода из состояния в состояние имеет шесть событий, каждому из событий соответствует вероятность перехода. Обозначим их $p_{11}, p_{12}, p_{13}, p_{21}, p_{22}, p_{23}, p_{31}, p_{32}$ и p_{33} .

Поскольку состояние либо переходит само в себя, либо в другое, то:

$$p_{11} + p_{12} + p_{13} = 1;$$

$$p_{21} + p_{22} + p_{23} = 1;$$

$$p_{31} + p_{32} + p_{33} = 1.$$

Соответствующая матрица переходных вероятностей процесса имеет вид:

$$P = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} \end{pmatrix}$$

Для предотвращения загрязнения почвы можно проводить различные мероприятия, предотвращающие разлив нефти, затрачивая на это определенные средства. При разливе нефти придется затрачивать средства для восстановления нормального состояния почвы. Чтобы рассмотреть задачу принятия решений в перспективе, введем матрицу R определяющую доходы и затраты в денежном эквиваленте, соответствующую матрице перехода.

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix}$$

С помощью этих матриц можно выбрать наилучшую стратегию принятия решения, основываясь на максимизации ожидаемого дохода.

Обозначим через $f_n(i)$ оптимальный ожидаемый доход, полученный на этапах от n до N включительно при условии, что система находится в начале этапа n в состоянии i и число этапов N конечно.

Обратное рекуррентное уравнение, связывающее f_n и f_{n+1} , можно записать в виде

$$f_n(i) = \max \left\{ \sum_{j=1}^m p_{ij}^k [r_{ij}^k + f_{n+1}(j)] \right\},$$

где $n=1,2,\dots,N$, $f_{n+1}(i) \equiv 0$ для всех i .

Приведенное уравнение основано на том, что накапливающийся доход $[r_{ij}^k + f_{n+1}(j)]$ получается в результате перехода из состояния i на этапе n в состояние j на этапе $n+1$ с вероятностью p_{ij}^k . Введем обозначение

$$v_i^k = \sum_{j=1}^m p_{ij}^k r_{ij}^k,$$

тогда рекуррентное уравнение можно записать следующим образом:

$$f_N(i) = \max(v_i^k),$$

$$f_n(i) = \max \left\{ v_i^k + \sum_{j=1}^m p_{ij}^k f_{n+1}(j) \right\}, n = 1, 2, \dots, N-1.$$

Для примера рассмотрим задачу принятия решения, когда $k = 1$, что соответствует решению не вкладывать средства в экологию, и $k = 2$ – вкладывать деньги в улучшение почвы и предотвращения разлива нефти.

Тогда

$$P^1 = \begin{pmatrix} 0,2 & 0,5 & 0,3 \\ 0 & 0,5 & 0,5 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad R^1 = \begin{pmatrix} 7 & 6 & 3 \\ 0 & 5 & 1 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix},$$

$$P^2 = \begin{pmatrix} 0,3 & 0,6 & 0,1 \\ 0,1 & 0,6 & 0,3 \\ 0,05 & 0,4 & 0,55 \end{pmatrix}, \quad R^2 = \begin{pmatrix} 6 & 5 & -1 \\ 7 & 4 & 0 \\ 6 & 3 & -2 \end{pmatrix}.$$

Для переходной матрицы P^1 , если в текущем году состояние почвы относительно удовлетворительное (вторая строка матрицы), то в следующем году оно может остаться удовлетворительным с вероятностью 0,5 или стать плохим p_{23} с той же вероятностью. При этом доход в первом случае составит $r_{22} = 5$ у.е., во втором – $r_{23} = 1$ у.е., а накапливающийся доход составит:

$$v_2^1 = 0 \times 0 + 0,5 \times 5 + 0,5 \times 1 = 3.$$

Рассчитаем остальные значения, сведя их в табл. 3.

Таблица 3. Выбор оптимального решения вложения материальных средств для предотвращения экологической катастрофы

j	V_i^k		$f_1(i)$	Оптимальное решение k
	k=1	k=2		
1	5,3	4,7	5,3	1
2	3	3,1	3,1	2
3	-1	0,4	0,4	2

Эти значения показывают, если состояние почвы в начале периода хорошее (состояние 1), то при одном переходе оптимальный ожидаемый годовой доход составляет 5,3 у.е. Если в начальный период состояние почвы относительно удовлетворительное (состояние 2) или плохое (состояние 3), то оптимальным будет решение $k=2$ – вкладывать деньги в улучшение почвы и предотвращения разлива нефти с ожидаемыми годовыми доходами 3,1 и 0,4.

Аналогично можно смоделировать задачи принятия решения с конечным и бесконечным числом этапов, причем переходные вероятности и функции дохода не обязательно должны быть одинаковы для каждого года. Данные задачи принятия решения решаются в виде задачи линейного программирования.

Литература

1. Федеральный закон об охране окружающей среды от 10.01.2002 № 7-ФЗ.
2. Федеральный закон об экологической экспертизе от 23.11.95 № 174-ФЗ.
3. Контроль химических и биологических параметров окружающей среды / под ред. Л. К. Исаева. – СПб.: Крисмас+, 1998. – 896 с.
4. Инструкция по определению и возмещению вреда (ущерба), причиненного в результате деградации, загрязнения и захламления земель. Госкомитет РФ по охране окружающей среды. Госкомитет РФ по ресурсам и землеустройству. – М., 1998. – 35 с.
5. Государственная система санитарно-эпидемиологического нормирования РФ. Федеральные санитарные правила и гигиенические нормативы. 2.1.7. Почва, очистка населенных мест, бытовые и промышленные отходы. Ориентировочные допустимые концентрации (ОДК) нефти и нефтепродуктов в почвах. Издание официальное. Проект. – М., 2002.
6. Критерии оценки экологической обстановки территорий для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия. – М., 1992.
7. Хрусталева А. П., Редина М. М. Охрана окружающей среды при добыче нефти. – М.: Дело, 2006. – 552 с.
8. Временная типовая методика определения экономической эффективности осуществления природоохранных мероприятий и оценки ущерба, причиняемому народному хозяйству загрязнением окружающей среды. – М., 1986.
9. Kemeny J. G., Snell J. L. (1960) Finite Markov chains. - The University Series in Undergraduate Mathematics. - Princeton: Van Nostrand (пер. Дж. Дж. Кемени, Дж. Л. Снелл (1970) Конечные цепи Маркова. – М.: Наука. – 272 с.)