

## ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ АНАЛИЗА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ АКВАТОРИЙ СОРБЦИОННО-МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

*Виктор Карлович Григорьев, канд. техн. наук, доц.*

*E-mail: grigoriev@mirea.ru*

*http://www.mirea.ru*

*Анатолий Анатольевич Антонов, программист*

*E-mail: antonov@mirea.ru*

*Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и  
автоматики МГТУ МИРЭА*

*https://www.mirea.ru*

*В статье рассматривается математическая модель для исследования процесса аварийного разлива нефти в водной среде. Описывается базирующийся на этой модели и разработанный авторами программный комплекс. Рассматриваются возможности комплекса по моделированию процессов очистки нефтяного пятна в прибрежной зоне с помощью биодеструкторов углеводородов. Дается графическое представление результатов моделирования распространения и очистки прибрежных зон от углеводородных загрязнителей.*

*Ключевые слова: Прибрежная зона, распространение углеводородов в водной среде, математическая модель, штаммы деструкторов углеводородов, программный комплекс моделирования, аварийный разлив нефти*



**В.К. Григорьев**

### **Введение**

Эффективные действия по ликвидации аварий и обоснованные профилактические работы по предотвращению аварий предполагают детальное изучение процессов, протекающих при загрязнении морских прибрежных зон в результате техногенных катастроф (разлива нефтепродуктов) и влияния на эти процессы различных управленческих решений. Одним из наиболее адекватных методов изучения аварий является метод математического моделирования.

Современные мощные компьютеры обеспечивают возможности детального математического моделирования сложных химико-биологических процессов, базовые программные средства (такие как СУБД, Графические среды и т.п.) дают возможность обработки и визуализации больших и сложных структур данных в реальном масштабе времени, а во многих случаях и с многократным ускорением. В настоящее время особое значение приобретает удобство использования (usability) компьютерных средств поддержки научных исследований и технологических процессов в различных областях человеческой деятельности, в частности, в экологии.

Причем программная реализация таких методов в виде моделирующей системы позволяет не только анализировать численные характеристики параметров аварий при ее различном течении в зависимости от внешних воздействий. При надлежащем интерфейсе, такая система может использоваться при обучении сотрудников различных служб, участвующих в мероприятиях по предотвращению, локализации и ликвидации последствий аварий [1].

В статье рассматривается программный комплекс для исследования процессов распространения нефтепродуктов и микроорганизмов-деструкторов углеводородов в водной



**А.А. Антонов**

среде и анализа технологических параметров процесса очистки акваторий сорбционно-микробиологическим методом. Этот программный комплекс поддерживает исследования, направленные на восстановление природных регуляторных связей в различных природных экосистемах, нарушенных вследствие всевозрастающего техногенного воздействия общества. Накоплен обширный материал, свидетельствующий о том, что нарастающие количества загрязнений окружающей среды приводят к нарушению естественных биоценозов, обеднению количественного и качественного состава микрофлоры, ухудшению физических свойств воды и почв. Это, в свою очередь, резко снижает индекс биоразнообразия и ухудшает экологическую ситуацию в районах, подверженных техногенному воздействию. В последние годы интерес к фундаментальному исследованию процессов биологической реабилитации окружающей среды, загрязненной ксенобиотиками, в частности, нефтью и нефтепродуктами, заметно возрос. Однако, несмотря на достаточное количество публикаций, посвященных решению этой задачи, они часто имеют рекламный характер, в них отсутствует системный комплексный подход, предусматривающий восстановление природных биоценозов, базирующийся на изучении процессов, закономерностей и механизмов их саморегуляции.

#### **Математическая модель процесса распространения загрязняющих веществ в водоеме**

Основываясь на результатах работы [2] отнесем к значимым параметрам оценки экологических последствий аварии или залповых сбросов загрязнителей концентрацию самого загрязнителя, потребление кислорода, а также концентрация растворенного кислорода.

На распространение культуры, попавшей в прибрежную полосу, существенное влияние оказывают следующие факторы:

- форма водоема;
- местоположение в водоеме створа слива поллютантов;
- наличие станций аэрации;
- наличие течений в водоеме.

Математическая модель процесса распространения загрязняющих веществ в водоеме расширяет функциональные возможности модели, описанной в работе [2] на произвольный тип загрязняющих веществ. Она учитывает такие процессы, как: аллювиальные отложения поллюантов, распространение поллюантов в виде пленки на поверхности водоема, а также добавляет процессы реарации, респирации и фотосинтеза кислорода.

Задача распространения загрязнения при залповых выбросах в водоеме, математически описывается совокупностью систем дифференциальных уравнений в частных производных параболического типа, для которых решается задача Дирихле и обыкновенных дифференциальных уравнений, для которых решается задача Коши, а ее решение определяется суперпозицией их решений.

$$\nabla^2 C(r,t) - \frac{\partial C(r,t)}{\partial t} = 0, \quad (1)$$

где  $\nabla$  – лапласиан;

$C$  – концентрация нефтепродуктов в точке  $r$  в момент времени  $t$ ;

$r$  – 3-мерный вектор;

$t$  – текущее время.

С учетом течений уравнение (1) трансформируется в уравнение (2):

$$\frac{\partial C(r,t)}{\partial t} = D\nabla C(r,t) + V\Delta C(r,t), \quad (2)$$

где  $\Delta$  – оператор набла;

$D$  – коэффициент диффузии;

$V$  – скорость течения для кислорода.

В основе учета микроорганизмов-деструкторов (с точки зрения потребления нефтепродуктов), основанных на теоретических и экспериментальных исследованиях в области восстановления природных биоценозов, лежит теоретическая концепция и базирующиеся на ней новые научно-методические подходы к решению ряда актуальных проблем экологии. В основе их лежат разработки по изучению процессов биовосстановления объектов окружающей среды и математическому моделированию этих процессов. Скрининг штаммов-деструкторов углеводов из почв разных типов и природно-климатических зон позволяет отобрать, изучить и идентифицировать штаммы, активно окисляющие различные классы ксенобиотиков, в том числе, углеводов и исследовать динамику численности микроорганизмов разных физиологических групп, их взаимное влияние в биоценозах [3].

Поскольку микробы-деструкторы чрезвычайно чувствительны к метеорологическим условиям и химическому составу среды, учет последних становится необходимым элементом математического моделирования.

В систему вводится уравнение (3) для кислорода с добавлением возможности респирации, реэрации и фотосинтеза и совокупность уравнений учета микроорганизмов

$$\frac{\partial O_2(r,t)}{\partial t} = \nabla O_2(r,t) + V \Delta O_2(r,t) + K_p (O_2^{100\%} - O_2) + \frac{K_\phi}{h}, \quad (3)$$

где  $O_2$  – содержание кислорода в точке  $r$  в момент времени  $t$ ;

$K_p$  – коэффициент респирации/реэрации;

$K_\phi$  – коэффициент фотосинтеза.

Учет биологических микроорганизмов (с точки зрения потребления кислорода) дополнительно вносит в систему следующую совокупность уравнений:

$$C(r,t) = F_n(B(r,t), C(r,t)), \quad (4)$$

где  $B$  – концентрация деструкторов в точке  $r$  в момент времени  $t$  с учетом процессов роста и смерти;

$F_n$  – функция потребления деструкторами углеводов в точке  $r$  в момент времени  $t$ .

Пользуясь методом расслоения физических процессов, на одном шаге расчета будем отдельно решать краевую задачу для диффузии, для течения и отдельно для процессов фотосинтеза, респирации и реэрации. Задача последовательно решается для одного загрязнителя, а общее решение получается суперпозицией решений по отдельным загрязнителям. Отдельно решается задача по кислороду с учетом потребления кислорода загрязняющими веществами.

Перейдем к описанию разностных схем, используемых при аппроксимации совокупности систем дифференциальных уравнений.

Решение уравнения диффузии основывается на явной шеститочечной разностной схеме:

$$\frac{C_i^{n+1} - C_i^n}{\tau} - D_i^n \frac{C_{i+1}^n - 2C_i^n + C_{i-1}^n}{h^2} = 0,$$

где  $\tau$  – шаг по времени;

$h$  – шаг по пространственной координате.

Решение уравнения переноса основывается на разностной схеме «ориентированный уголок»:

$$\begin{cases} \frac{C_i^{n+1} - C_i^n}{\tau} + V_i^n \frac{C_i^n - C_{i-1}^n}{h} = 0, & V_i^n \geq 0 \\ \frac{C_i^{n+1} - C_i^n}{\tau} + V_i^n \frac{C_{i+1}^n - C_i^n}{h} = 0, & V_i^n < 0 \end{cases}$$

Решение уравнения реэрации и респирации основывается на следующей разностной схеме:

$$(O_2)_i^{n+1} = (O_2)_i^n + K_p((O_2^{100\%})_i^n - (O_2)_i^n).$$

Решение уравнения фотосинтеза основывается на следующей разностной схеме:

$$(O_2)_i^{n+1} = (O_2)_i^n + \frac{K_\phi}{h}.$$

Необходимо отметить и условие устойчивости разностных схем, при котором решение аппроксимационной задачи будет сходиться:

$$\frac{d\tau}{h^2} \leq \frac{1}{2},$$

где  $d$  – коэффициент диффузии;

$\tau$  – шаг по времени;

$h$  – шаг по пространственной координате.

Программная система процесса распространения загрязняющих веществ в водоеме описывает функциональные возможности базирующейся на вышеописанной математической модели для произвольного типа загрязняющих веществ и микроорганизмов-деструкторов. Она учитывает такие процессы, как: аллювиальные отложения полиантов, распространение полиантов в виде пленки на поверхности водоема, а также добавляет процессы реэрации, респирации и фотосинтеза кислорода, а также учитывает разложение углеводов с помощью деструкторов

### Программная модель

Программный комплекс состоит из четырех основных функциональных подсистем: управляющей подсистемы, подсистемы ввода и редактирования исходных данных, подсистемы выполнения расчетов и графического отображения результатов в динамике, подсистемы отображения сохраненных в базу данных результатов расчетов.

Подсистема ввода и редактирования исходных данных позволяет создавать, редактировать и удалять через мастер таблиц или графический редактор: типы загрязняющих веществ, источники загрязняющих веществ, станции аэрации, течения, острова, впадины и другие объекты, а также показывать созданные графические объекты в различных конфигурациях (рисунок 1).

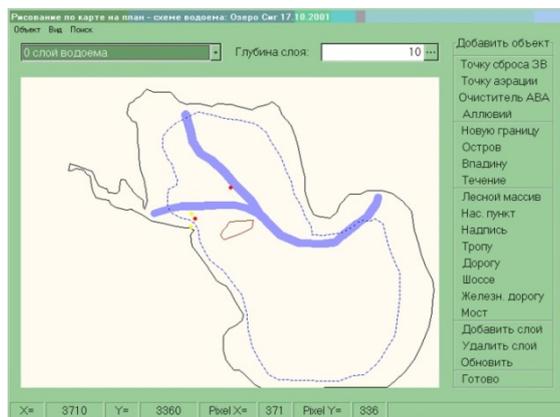


Рисунок 1 – Интерфейс графического редактора системы

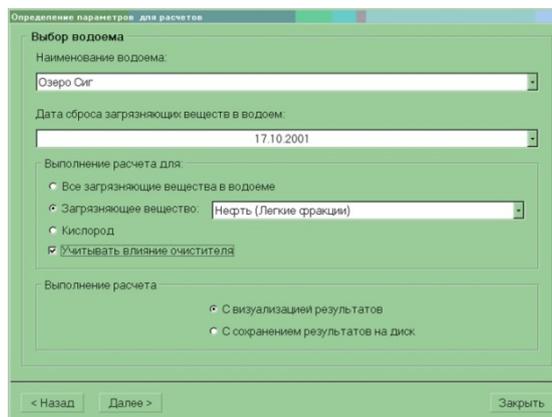


Рисунок 2 – Параметры моделирования

В подсистеме можно использовать образы реальных географических карт как канвы для создания схемы водоема. Так как почти все описываемые объекты трехмерные, то их создание и задание свойств реализовано по слоям в глубину практически с любой необходимой точностью.

Подсистема моделирования и графического отображения результатов обеспечивает следующие функции работы программного комплекса:

1. Выбор названия водоема, даты и места сброса загрязняющих веществ и сорбентов с микробиологическими деструкторами в водоем, тип уравнений для моделирования распространения загрязняющих веществ и вариант выполнения расчетов.

2. Выбор области водоема, для которой производятся расчеты и параметры для моделирования (рисунок 2).

3. Задание шага сетки по осям X, Y, Z и времени, автоматическое определение требуемого объема памяти для сетки и вычислений, показ объема свободного места на диске.

4. Указание параметров визуализации результатов (начальный шаг, интервал, определяющий через какое количество шагов, осуществляется визуализация, тип визуализации результатов, показ концентрации в точке, показ линии створа и др.). Графическая визуализация распространения, загрязняющих веществ, с возможностью остановки и запуска процесса (рисунок 3).

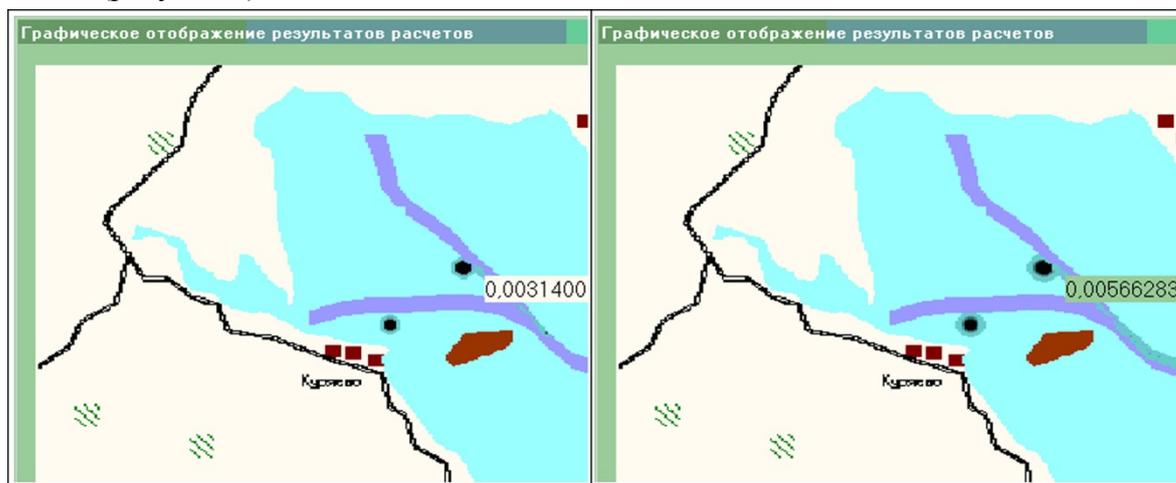


Рисунок 3 – Динамика распространения нефтяного пятна без влияния деструкторов

5. Сохранение результатов процесса распространения загрязняющих веществ и сорбентов в базе данных.



Рисунок 4 – Динамика распространения нефтяного пятна с учетом влияния деструкторов

6. Решение задач моделирования требует обработки больших массивов информации и реализации параллельных расчетов, для обеспечения независимости моделируемых физических процессов. В рассматриваемой системе моделировались реальные физические объекты, эти объекты имеют различную размерность и сложную структуру взаимодействия между собой. Поэтому данная задача решалась на основе создания различных про-

граммных модулей и классов объектов, в соответствии с принципами объектно-ориентированного программирования.

Расчеты и моделирование процесса распространения, сорбции и деструкции загрязняющих веществ (рисунок 4).

### Заключение

Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты. Предложенный авторами подход и его программная реализация позволяет:

- исследовать эффективность микроорганизмов-деструкторов в различных условиях;
- проводить анализ развития чрезвычайных экологических ситуаций.

Работоспособность программного комплекса проверялась при моделировании разлива нефти в морской прибрежной полосе (рисунок 5) и анализа результатов возможного использования деструкторов-сорбентов для защиты от углеводородных загрязнений прибрежной морской зоны (рисунки 6, 7).

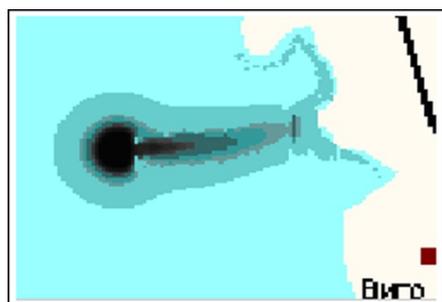


Рисунок 5 – Распространение нефтяного загрязнения при ветре от моря к берегу



Рисунок 6 – Распространение деструкторов

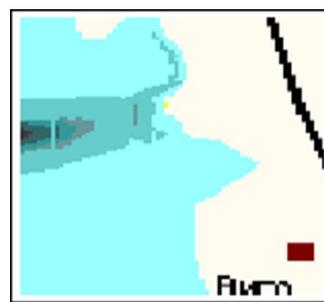


Рисунок 7 – Влияние деструкторов на распространение нефтяного загрязнения

Данный программный комплекс использовался в работах, проводимых совместно с институтом водных проблем.

### Литература

1. Григорьев В.К. Технология опережающего обучения массовых профессиональных пользователей распределенных информационных систем // Информатизация образования и науки. 2012. № 16. С. 183–195.
2. Grigoriev V.K., Boikova I.V. Express-Analysis of Diffusion Variants of Petroleum and Technological Support of Clearing Process in Water Areas by Sorbent-Microbiologic Method Application Suite // Труды 3-го симпозиума «Качество воды и управление водными ресурсами». СПб., 2005.
3. Бойкова И.В. и др. Оценка биологической эффективности биопрепарата на основе штамма 0952 streptomycetes candidus против varroa jacobsoni / И.В. Бойкова, Г.С. Талалай, А.И. Анисимов, Д.А. Гвоздарев // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2008. № 8.

### Software package for the analysis of the technological parameters of the processes purifying waters sorption-microbiological method

**Viktor Karlovich Grigoriev**, candidate of technical Sciences, Associate Professor, Moscow state technical University of Radioengineering, electronics and automation

**Anatoliy Anatolievich Antonov**, programmer, Moscow state technical University of Radioengineering, electronics and automation

*The article discusses the mathematical model for the study of the process of oil spills in the aquatic environment. It describes based on this model and designed by the authors-tion software package. The possibilities of complex simulation mo-cleaning processes of the oil slick in the coastal zone using Biaudet-struktorov hydrocarbons. Gives a graphical representation of the results of modeling, propagation and purification of coastal zones of hydrocarbon pollutants.*

*Keywords: The coastal zone, distribution of hydrocarbons in the aquatic environment, mathematical model, strains destructors hydrocarbons software system modeling, emergency oil spill*