

*А.С. Широков, В.А. Кузьмин, Д.В. Шилов, А.В. Дикинис, М.Э. Иванов, Е.Д. Родионова*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ НА ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ С ЦЕЛЬЮ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНИЦЫ ЗОНЫ ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ**

*A.S. Shirokov, V.A. Kuzmin, D.V. Shilov, A.V. Dikinis, M.E. Ivanov, E.D. Rodionova*

## **MODELING POLLUTIONS DISTRIBUTION ON THE WATER SURFACE AIMED TO BOUND A HAZARD ZONE**

*В статье описан новый способ моделирования распространения техногенных загрязняющих веществ на поверхности водотоков с целью определения границы зоны чрезвычайной ситуации. Рассмотрены вопросы влияния внешних факторов на этот процесс. Обоснованы рекомендуемые факторы для определения границ зон ЧС с использованием многофакторного моделирования вариантов развития аварийной ситуации.*

*Ключевые слова: загрязняющие вещества, чрезвычайные ситуации, водотоки, факторы распространения, моделирование, информационная система, программный комплекс.*

*In this paper, a new approach to modeling pollution distribution on the water surface aimed to bound a hazard zone is considered, as well as issues associated with external factors impact on this process. Suggested factors of the hazard zone bounding are supported by using the multifactor modeling scenarios of the hazard development.*

*Keywords: pollutions, hazards, streams, factors of distribution, modeling, information system, software set.*

Одним из основных путей снижения последствий от аварийных ситуаций при транспортировке опасных веществ является планирование и выполнение мероприятий по предупреждению и тщательной подготовке к локализации и ликвидации возникших аварийных ситуаций. Для этого необходимо заблаговременно оценивать возможные последствия аварий и их воздействие на окружающую среду. В целях обеспечения эффективности мероприятий по предупреждению и ликвидации аварийных ситуаций в Российской Федерации был разработан ряд информационных систем, предназначенных для поддержки принятия решений при возникновении ЧС природного и техногенного характера. Их анализ позволил сделать следующие выводы:

В рассмотренных системах практически не отражено влияние гидрометеорологических условий (таких, как направление и сила ветра, скорость течения и др.) на

распространение техногенных загрязняющих веществ (ТЗВ), и, кроме того, в них не предусмотрено ни количественное, ни качественное оценивание воздействия ТЗВ на окружающую среду.

- Отсутствуют системы автоматизированной поддержки принятия решений при аварийных разливах ТЗВ и выборе средств и способов их локализации и ликвидации.
- Большинство систем ориентировано на решение локальных задач на уровне небольшого предприятия или города и не обеспечивают решение задач регионального или территориального уровня.

Таким образом, был сформулирован перечень задач, требующих решения и рассмотренных при разработке программного комплекса (ПК) «Прогнозирование» – инструмента для моделирования распространения и расчета возможных сценариев поведения ТЗВ на водной поверхности. В его основе лежит математическая модель распространения ТЗВ на водной поверхности, в соответствии с современными представлениями об основных процессах распространения и физико-химической трансформации загрязняющих веществ на водной поверхности. Эта модель позволяет моделировать процессы переноса и трансформации ТЗВ под действием ветра и течений, растекания под действием сил плавучести и турбулентной диффузии, испарения, диспергирования, эмульгирования, осаждения на берега.

Распространение ТЗВ на водной поверхности зависит от двух видов параметров: неизменных параметров водоема или водотока и изменяющихся гидрометеорологических параметров. К первым относятся характеристики гидрологического объекта (тип берега, геометрические размеры и морфологические характеристики области разлива ТЗВ и природоохранных зон и др.). К изменяемым относятся параметры, характеризующие состояние окружающей среды (скорость течения, сила и направление ветра, температура воды и воздуха, высота волны, степень солености воды), а также объем и тип ТЗВ, попавшего в рассматриваемый водоем или водоток.

При прогнозировании аварийного разлива ТЗВ факторы, относящиеся к географическим объектам, зависят только от зоны развития чрезвычайной ситуации, поэтому имитационное моделирование необходимо производить непосредственно для каждого потенциального источника разлива.

Тем не менее, анализ распространения загрязняющих веществ на водной поверхности и математической модели позволил выделить семь потенциально важных факторов, которые могут влиять на распространение загрязняющего вещества на водной поверхности:

- тип загрязняющего вещества;
- объем разлива загрязняющего вещества;
- распределение поверхностных скоростей течения;
- скорость ветра и высота волны (связанные между собой факторы);
- скорость и направление ветра;
- температура воды;
- температура воздуха.

Общее возможное число вариантов, предусмотренных в текущей пилотной версии ПК «Прогнозирование», приведено в таблице 1.

Таблица 1

**Факторы, влияющие на распространение загрязняющих веществ на водной поверхности**

Факторы	Количество вариантов
Изменяемые параметры	
1. Объем разлива	>5
2. Тип разлива	>3
3. Скорость течения	>3
4. Направление ветра	8
5. Скорость ветра	12
6. Температура воды	3
7. Температура воздуха	3
Всего	>38 880

В связи с тем, что моделирование такого количества вариантов требует наличия значительных вычислительных ресурсов и практически невозможно, возникает задача выделения значимых факторов, влияющих на распространение загрязняющих веществ на водной поверхности для определения положения загрязняющего вещества на водной поверхности в зависимости от времени с момента разлива.

Для решения этой задачи был использован метод планирования эксперимента. Среди основных методов планирования, применяемых на разных этапах исследования, целесообразно использовать:

- планирование отсеивающего эксперимента, суть которого заключается в выделении из всей совокупности группы существенных факторов, подлежащих дальнейшему детальному изучению;
- планирование эксперимента для дисперсионного анализа, т.е. составление планов для объектов с качественными факторами;
- планирование регрессионного эксперимента, позволяющего получать регрессионные модели (полиномиальные и иные);
- планирование экстремального эксперимента, главной задачей которого является экспериментальная оптимизация объекта исследования;
- планирование при изучении динамических процессов и т.д.

Инициатором применения планирования эксперимента является Рональд А. Фишер, другой автор известных первых работ – Френк Йетс. Далее идеи планирования эксперимента формировались в трудах Дж. Бокса, Дж. Кифера. В нашей стране – в трудах Г.К. Круга, Е.В. Маркова и др. [1, 3, 4].

В настоящее время методы планирования эксперимента заложены в специализированных пакетах, широко представленных на рынке программных продуктов, например: StatGraphics, Statistica, SPSS, SYSTAT и др. Для решения данной задачи наиболее целесообразно использовать метод планирования эксперимента с применением для выбора плана эксперимента и анализа полученных данных компьютерной программы STATISTICA 6.0.

Для исследования использовался дробный двухуровневый факторный план Бокса и Хантера, который позволяет осуществить тестирование значимости исследуемых факторов на распространение загрязняющих веществ на водной поверхности.

Параметр скорости течения изменялся в зависимости от времени моделирования, поэтому задавалось различное время начала расчета.

В качестве примера был рассмотрен источника разлива нефти в заливе Шелихова. План многофакторного эксперимента представлен в таблице 2.

Таблица 2

**План многофакторного эксперимента по моделированию распространения различных видов ТЗВ на водной поверхности**

	1 Объем	2 Нефтепродукт	3 Скорость ветра, высота волны	4 Температура воды	5 Температура воздуха	6 Течение	7 Направление ветра	8 Перемещение 4 часа
1	500т	Диз.топливо	5м/с 0,5м	2град	-5град	0часов	0град	19,2
2	1500т	Диз.топливо	5м/с 0,5м	2град	20град	0часов	270град	21,8
3	500т	Газовый конденсат	5м/с 0,5м	2град	20град	3часа	0град	4
4	1500т	Газовый конденсат	5м/с 0,5м	2град	-5град	3часа	270град	2,1
5	500т	Диз.топливо	20м/с 7,5м	2град	20град	3часа	270град	5,3
6	1500т	Диз.топливо	20м/с 7,5м	2град	-5град	3часа	0град	4,8
7	500т	Газовый конденсат	20м/с 7,5м	2град	-5град	0часов	270град	7,4
8	1500т	Газовый конденсат	20м/с 7,5м	2град	20град	0часов	0град	5,1
9	500т	Диз.топливо	5м/с 0,5м	12град	-5град	3часа	270град	2
10	1500т	Диз.топливо	5м/с 0,5м	12град	20град	3часа	0град	4
11	500т	Газовый конденсат	5м/с 0,5м	12град	20град	0часов	270град	21,8
12	1500т	Газовый конденсат	5м/с 0,5м	12град	-5град	0часов	0град	19,3
13	500т	Диз.топливо	20м/с 7,5м	12град	20град	0часов	0град	6,1
14	1500т	Диз.топливо	20м/с 7,5м	12град	-5град	0часов	270град	14,1
15	500т	Газовый конденсат	20м/с 7,5м	12град	-5град	3часа	0град	0,3
16	1500т	Газовый конденсат	20м/с 7,5м	12град	20град	3часа	270град	3,9

Анализ результатов моделирования представлен в таблице 3.

Таблица 3

**Анализ результатов моделирования распространения различных видов ТЗВ на водной поверхности**

Фактор	Оценки эффектов; R-кв = ,75918; Скор. ,54845 (Таблица) 2**(7-3) план; Остаточн. SS=26,16406 ЗП: Перемещение 4 часа									
	Эффект	Ст.Ош.	t(t)	p	-95, % Дов.Пред	+95, % Дов.Пред	Козф.	Ст.Ош. Козф.	-95, % Дов.Пред	+95, % Дов.Пред
Сред/Св.член	8,8250	1,278770	6,90116	0,000124	5,8762	11,77385	8,82500	1,278770	5,87615	11,77385
(1)Объем	1,1250	2,557541	0,43988	0,671669	-4,7727	7,02270	0,56250	1,278770	-2,36635	3,51135
(2)Нефтепродукт	-1,6750	2,557541	-0,65493	0,530891	-7,5727	4,22270	-0,83750	1,278770	-3,78635	2,11135
(3)Скорость ветра, высота волны	-5,9000	2,557541	-2,30690	0,049930	-11,7977	-0,00230	-2,95000	1,278770	-5,89885	-0,00115
(4)Температура воды	0,2250	2,557541	0,08798	0,932059	-5,6727	6,12270	0,11250	1,278770	-2,83635	3,06135
(5)Температура воздуха	0,3500	2,557541	0,13685	0,894531	-5,5477	6,24770	0,17500	1,278770	-2,77385	3,12385
(6)Течение	-11,0500	2,557541	-4,32056	0,002544	-16,9477	-5,15230	-5,52500	1,278770	-8,47385	-2,57615
(7)Направление ветра	1,9500	2,557541	0,76245	0,467673	-3,9477	7,84770	0,97500	1,278770	-1,97385	3,92385

Результаты проведения эксперимента по моделированию распространения различных видов ТЗВ на водной поверхности в виде карты Парето представлены на рисунке 1.



Рис. 1. Карта Парето стандартизованных эффектов.

Анализ многофакторного эксперимента показал, что на распространение загрязняющих веществ на водной поверхности (зависимую переменную) значимо влияют только 5 главных факторов: тип загрязняющего вещества, объем разлива загрязняющего вещества, скорость течения, скорость ветра и высота волны, направление ветра.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что при существующем уровне развития вычислительной техники и имеющихся вычислительных ресурсах для определения границ зоны ЧС целесообразно проводить моделирование распространения ТЗВ на водной поверхности для каждого потенциального источника разлива и учитывать действие трех факторов: скорость течения, направление ветра и скорость ветра. Это позволяет снизить число сценариев, необходимых для моделирования и прогнозирования аварийных разливов.

По мере развития вычислительной техники и увеличения доступных вычислительных ресурсов число сценариев, а, следовательно, и число запусков модели может быть увеличено. Это, в свою очередь, позволит усовершенствовать функциональность ПК «Прогнозирование» путем добавления в очередные версии ПК следующих опций:

- возможности независимого моделирования поля поверхностных скоростей рассматриваемого водоема или водотока;
- возможности выбора вида и расчета значения целевой функции, отражающей точность моделирования и эффективность прогнозирования распространения ТЗВ (при наличии данных наблюдений) [5-9, 11];

- возможности автоматизированного получения и обработки гидрометеорологических данных из различных источников, включая прогнозы [8-10];
- возможности выбора эффективной оптимизационной процедуры при автоматической параметризации моделей [5-11];
- предоставления автоматизированной поддержки принятия эффективных управленческих решений на основе ансамблевых прогнозов распространения ТЗВ [2].

Однако даже текущая функциональность ПК «Прогнозирование» является достаточной для решения практической задачи моделирования и прогнозирования перемещения пятна ТЗВ по поверхности сравнительно крупных водоемов и водотоков, поверхностное поле скоростей которых стационарно и относительно близко к среднему состоянию. Если же присутствует нестационарность поля поверхностных скоростей или фактическая скорость потока отличается от средней, проблема может быть решена путем генерирования дополнительных сценариев и определения наиболее реалистичной части ансамбля.

Работа выполнена в рамках мероприятия 1.1 Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (государственный контракт № 14.740.11.0827 от 30 ноября 2010 г.).

### Литература

1. *Kuzmin V.* Fast and efficient optimization of hydrologic model parameters using a priori estimates and stepwise line search / Kuzmin V., Seo D.-J., Koren V. // Journal of Hydrology, vol. 353, iss. 1-2, 2008, pp. 109-128.
2. *Боровский А.И.* Защита внутренних водных путей от загрязнения / Боровский А.И., Гришин В.Т., Черкасов М.Д. – М.: Транспорт, 1981.
3. *Дикинис А.В.* Автоматизированная поддержка принятия решений на основе ансамблевых гидрометеорологических прогнозов/ Дикинис А.В., Кузьмин В.А., Галкин И.А., Сурков А.Г., Шилов Д.В. – СПб.: ОАО ГНИНГИ. Навигация и гидрография, 2012, № 34.
4. *Козлитин А.М.* Количественный анализ риска возможных разливов нефти и нефтепродуктов / Козлитин А.М., Попов А.И., Козлитин П.А. // Управление промышл. и эколог. безопасностью производственных объектов на основе риска: Междунар. науч. сб. – Саратов: СГТУ, 2005.
5. *Котляревский В.А.* Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий: Кн. 1 и 2. / Котляревский В.А. и др. – М.: АВС, 1998.
6. *Кузьмин В.А.* Отбор и параметризация прогностических моделей речного стока. – Метеорология и гидрология, 2001, № 3, с.85-90.
7. *Кузьмин В.А.* Алгоритмы автоматической калибровки многопараметрических моделей, используемых в оперативных системах прогнозирования паводков. – Метеорология и гидрология, 2009, № 7, с. 74-85.
8. *Кузьмин В.А.* Комплексное использование данных дистанционного зондирования, наземных наблюдений и численных прогнозов погоды при автоматизированном прогнозировании стока / Кузьмин В.А., Дикинис А.В. // Ученые записки РГГМУ, 2011, № 22, с. 38-44.
9. *Кузьмин В.А.* Основные принципы автоматической калибровки многопараметрических моделей, используемых в оперативных системах прогнозирования дождевых паводков. – Метеорология и гидрология, 2009, № 6, с.88-99.
10. *Кузьмин В.А.* Принципы автоматической обработки данных в автоматизированных системах прогнозирования стока / Кузьмин В.А., Сурков А.Г., Шеманаев К.В. // Ученые записки РГГМУ, 2011, № 22, с. 28-37.
11. *Кузьмин В.А.* Фоновое прогнозирование стока в режиме, близком к реальному времени / Кузьмин В.А., У.Е. Коротыгина, Макин И.С., Сергеенко С.Ю., Румянцев Д.Ю. // Ученые записки РГГМУ, 2011, № 22, с. 16-27.