

Анализ материалов по этим водосборам показал, что для них норма стока, а также остальные аргументы, использованные в корреляционной зависимости, получены по тем или иным причинам с пониженной точностью.

**Таблица 2 – Отклонение расчетных расходов летне-осеннего стока от наблюдаемых величин**

Отклонения, в %	Число случаев			
	Средний за сезон		Минимальный за сезон	
	частота	в процентах	частота	в процентах
0-5	24	37	19	29
6-10	16	24	13	20
11-15	8	12	6	9
16-20	7	11	9	14
21-25	2	3	6	9
26-30	4	6	2	3
31-50	3	5	3	5
более 50	1	2	7	11

Погрешности расчета по уравнениям (3) и (4) имеют аналогичный характер. Это еще раз убеждает, что включение в корреляционную связь дополнительной переменной (глубина вреза) не позволяет получить более точной расчетной зависимости.

#### Список использованных источников

1. Артемьева Н.П. Анализ и расчет минимального стока статистическими методами (на примере рек Полесской низменности). Автореферат на соискание ученой степени кандидата технических наук. Л., 1975, 26 с.
2. Рождественский А.В., Чеботарев А.И. Статистические методы в гидрологии. Л., Гидрометеиздат, 1974, 424 с.

УДК 502.5

А. В. Бурмакова, В. В. Смелов  
БГТУ, г. Минск

## ОПИСАНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИЙНОГО ПРОЛИВА НЕФТЕПРОДУКТОВ

Математическая модель содержит формулы вычисления для прогноза различных аварийных ситуаций. Существует множество математических моделей, которые позволяют рассчитать последствия загрязнения водных объектов, загрязнения атмосферы в результате испарения нефтепродуктов, отдельных частей геологической среды и другие. Уникальностью данной модели является то, что она содержит формулы и методы решений не только отдельного слоя геологической среды, а включает в себя поверхностный слой, грунтовый и почвенный слой, а также рассчитывает последствия аварии в грунтовых водах и распространения загрязнения с ними.

Исходными для математической модели прогнозирования (ММП) являются следующие данные.

1. Географические координаты центра пролива, объем и тип (бензин, керосин, сырая нефть и пр.) пролитого нефтепродукта (НП).
2. Данные о физико-химических свойствах нефтепродуктов.
3. Данные о свойствах грунтов.
4. Картографическая информация: рельеф местности, глубина залегания грунтовых вод, мощность грунтового и почвенного слоя, коэффициенты задержки НП в грунте и почве.
5. Тип пролива нефтепродукта.

Загрязнение нефтепродуктами может произойти в результате следующих типов пролива:

1) наземного пролива нефтепродуктов (потеря нефтепродуктов при транспортировке с места добычи нефти, выбросы нефти при бурении скважин, аварии на автозаправочных станциях и прочие);

2) пролива в результате аварии подземного трубопровода (изношенность нефтепровода, незаконные врезки в нефтепроводы и прочие); данный тип пролива подразделяется на под-типы с выходом НП на поверхность и без выхода НП на поверхность;

3) пролива в результате повреждения подземного резервуара с нефтепродуктом, который хранится под землей.

В зависимости от типа аварии сценарий загрязнения геологической среды будет меняться. Соответственно будут меняться вычисления, выполняемые в рамках ММП.

ММП позволяет прогнозировать: площадь и форму наземного пятна загрязнения, массу испарения НП с поверхностного слоя, глубину и скорость проникновения НП в почву и грунт, адсорбированную массу НП в почве и грунте, максимальную концентрацию НП в почве и грунте, максимальную концентрацию нефтепродуктов в грунтовых водах, временной интервал для достижения максимальной концентрации в грунтовых водах, скорость распространения фронта загрязнения с потоком грунтовых вод.

ММП является многоуровневой. На рисунке 1 отображены четыре уровня ММП (нумеруются сверху вниз от 1 до 4).

В таблице 1 перечислены уровни, значения и справочные данные, применяемые для вычислений на каждом уровне ММП.

*Поверхностный слой.* На первом уровне модели вычисляются следующие значения: масса испарения НП, площадь пятна загрязнения и форма пятна загрязнения. Расчеты для данного слоя выполняются в случае наземного пролива НП и аварии в подземном трубопроводе с выходом НП на поверхность.

*Площадь  $S_1$  пятна загрязнения при проливе НП на поверхность* вычисляется по следующей формуле:

$$S_1 = V_0 \cdot \chi d_1, \quad (1)$$

Коэффициент растекания нефтепродукта  $d_1$  является справочной величиной и зависит от типа и объема нефтепродукта, типа почвы, а также угла наклона поверхности [3].

При аварии на трубопроводах с выходом на дневную поверхность *площадь  $S_1$  пролива определяется по формуле:*

$$S_1 = 53,3 \times (V_0^{0.89}). \quad (2)$$

*Масса  $M_1$  испарившегося нефтепродукта* вычисляется по следующей формуле:

$$M_1 = S_1 \cdot \chi q_1(T). \quad (3)$$

Значение  $q_1(T)$  зависит от температуры  $T$  воздуха и является справочной величиной (кг/м<sup>2</sup>) [4].

Для вычисления *формы пятна загрязнения* применяется эвристический алгоритм, исходными данными для которого являются географические координаты центра, площадь  $S_1$  пролива, а также картографические данные о рельефе поверхности в окрестности центра. Результатом расчета является множество пар  $(x,y)$  координат границ пятна загрязнения. Высоты в точках вычисляются методом аппроксимации.

*Толщина наземного слоя пролитого нефтепродукта  $H_1$*  находится по формуле:

$$H_1 = \frac{V_0}{S_1}. \quad (4)$$

*Почвенный слой.* На втором уровне модели вычисляются: адсорбированная почвой масса НП, максимально возможная концентрация НП в почве и максимальная глубина проникновения НП в почву.

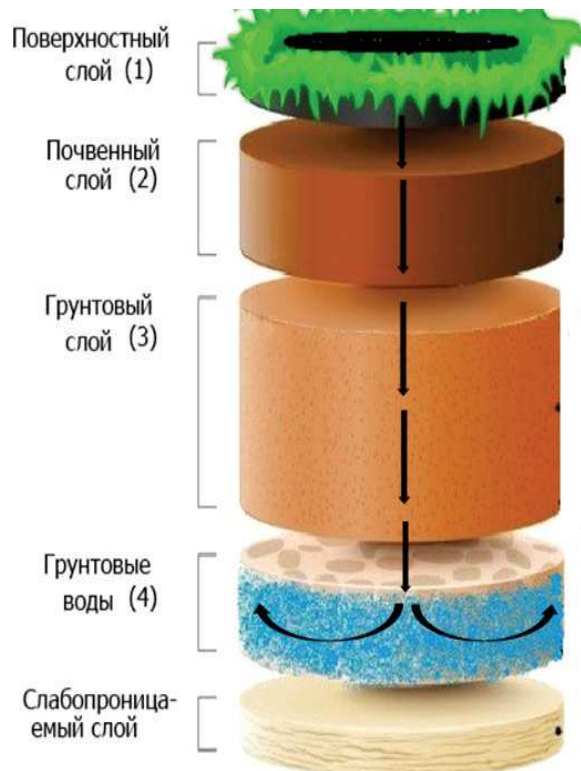


Рисунок 1 – Слои модели прогнозирования последствий пролива нефтепродуктов

Адсорбированная почвой масса  $M_2$  НП вычисляется по следующей формуле:

$$M_2 = S_1 \cdot h_2 \cdot u_2 \cdot \rho_0. \quad (5)$$

Значение  $u_2$  – нефтеемкость почвы, является максимальной возможной концентрацией НП в почве. Нефтеемкость  $u_2$  является справочной величиной [4], также как и средняя плотность НП  $\rho_0$  [5].

Концентрация НП в почве рассчитывается по следующей формуле:

$$C_2 = \begin{cases} \frac{M_2}{h_2 \cdot S_1}, & \text{если } M_2 \geq M_0 - M_1; \\ u_2, & \text{если } M_2 < M_0 - M_1. \end{cases} \quad (6)$$

Максимальная глубина проникновения  $H_2$  НП в почву вычисляется следующим образом:

$$H_2 = h_2 \cdot \sqrt{\frac{M_0 - M_1}{M_2}}. \quad (7)$$

*Грунтовый слой.* На третьем уровне модели вычисляются: скорость вертикального проникновения НП в грунт, адсорбированная грунтом масса НП, максимальная глубина проникновения НП в грунт, максимальная концентрация НП в грунте.

Если произошла авария в подземном нефтепроводе без выхода на поверхностный слой или в подземном резервуаре, то расчет ММП начинается с грунтового слоя.

Скорость вертикального проникновения  $v_3$  НП в грунт вычисляется по следующей формуле:

$$v_3 = \frac{k_B}{r_3}. \quad (8)$$

Таблица 1 – Значения, вычисляемые в ММП

№	Уровни модели	Величины		
		обозначение	ед. измерения	Наименование
0.	Исходные данные	$V_0$	(м <sup>3</sup> )	объем пролитого НП
		$\rho_0$	(кг/м <sup>3</sup> )	плотность НП
		$M_0$	(кг)	масса пролитого НП
		$\delta_0$	(кг/с <sup>2</sup> )	коэффициент поверхностного натяжения НП
1.	Поверхностный слой	$S_1$	(м <sup>2</sup> )	площадь пятна загрязнения
		$d_1$	(м <sup>-1</sup> )	коэффициент растекания НП
		$K_1$	(м <sup>-1</sup> )	эмпирический коэффициент
		$M_1$	(кг)	масса испарившегося нефтепродукта
		$q_1(T)$	(кг/м <sup>2</sup> )	удельная величина выбросов нефтепродукта
		$H_1$	(м)	толщина наземного слоя пролитого нефтепродукта
2.	Почвенный слой	$M_2$	(кг)	адсорбированная почвой масса НП
		$h_2$	(м)	средняя высота почвенного слоя
		$C_2$	-	концентрация загрязнения в почве
		$u_2$	-	нефтеемкость почвы
		$H_2$	(м)	максимальная глубина проникновения НП в почву
3.	Грунтовый слой	$v_3$	(м/с)	скорость вертикального проникновения НП в грунт
		$k_B$	(м/с)	коэффициент фильтрации воды
		$r_3$	-	коэффициент задержки НП в грунте
		$M_3$	(кг)	адсорбированная грунтовым слоем масса НП
		$h_3$	(м)	мощность слоя грунта
		$h_{рез}$	(м)	глубина залегания подземного нефтепровода
		$m_3$	-	пористость грунта, (от 0 до 1)
		$w_3$	-	капиллярная влагоёмкость грунта (от 0 до 1)
		$\rho_B$	(кг/м <sup>3</sup> )	плотность воды
		$\delta_B$	(кг/с <sup>2</sup> )	коэффициент поверхностного натяжения воды
		$H_3$	(м)	максимальная глубина проникновения НП в грунт
		$C_3$	-	максимальная концентрация НП в грунте
		$\rho_3$	(кг/м <sup>3</sup> )	средняя плотность грунта
		4.	Грунтовые воды	$t_4$
$l_4$	(м)			максимальное расстояние распространения фронта загрязнения от центра пролива НП с грунтовыми водами
$v_4$	(м/с)			горизонтальная скорость распространения фронта загрязнения с грунтовыми водами
$h_4$	(м)			толщина водоносного слоя, принимается за 1 м.
$h'_3$	(м)			мощность грунтового слоя в первой точке
$h''_3$	(м)			мощность грунтового слоя во второй точке
$C_4$	-			концентрация загрязнения в грунтовых водах

Коэффициент фильтрации воды  $k_B$  [6] и коэффициент задержки  $r_3$  НП [7] в грунте являются справочными величинами.

Адсорбированная грунтовым слоем масса  $M_3$  НП рассчитывается по формуле:

$$M_3 = \begin{cases} h_3 \times S_1 \times \rho_B \times m_3 \times w_3 \times \frac{\delta_0}{\delta_B}, & \text{наземный тип аварии;} \\ (h_3 - h_{рез}) \times S_1 \times \rho_B \times m_3 \times w_3 \times \frac{\delta_0}{\delta_B}, & \text{подземный тип аварии.} \end{cases} \quad (9)$$

Плотность воды  $\rho_B$  [8], коэффициент поверхностного натяжения НП  $\delta_0$ , коэффициент поверхностного натяжения воды  $\delta_B$  [9], пористость грунта  $m_3$  и капиллярная влагоёмкость грунта  $w_3$  [10] являются справочными величинами.

Максимальная глубина проникновения  $H_3$  НП в грунт зависит от адсорбированной в грунте массы и вычисляется следующим образом, следовательно, концентрация высчитывается используя формулу, или же, приравнивается к мощности грунтового слоя. Вычисляется по следующей формуле:

$$H_3 = \begin{cases} h_3 \times \frac{M_0 - (M_1 + M_2)}{M_3}, M_0 - (M_1 + M_2) \leq M_3; \\ h_3, M_0 - (M_1 + M_2) > M_3; \\ h_3 - h_{\text{рез}}, \text{ подземный тип аварии.} \end{cases} \quad (10)$$

Максимальная концентрация НП  $C_3$  в грунте зависит от адсорбированной в грунте массы, следовательно, концентрация высчитывается используя максимальную глубину проникновения НП в грунт, или же, заменяя ее на мощность грунтового слоя. Вычисляется по следующей формуле:

$$C_3 = \begin{cases} \frac{M_3}{S_1 \times H_3 \times \rho_3}, M_0 - (M_1 + M_2) \leq M_3; \\ \frac{M_3}{S_1 \times h_3 \times \rho_3}, M_0 - (M_1 + M_2) > M_3. \end{cases} \quad (11)$$

Средняя плотность грунта  $\rho_3$  является справочной величиной [11].

Уровень грунтовых вод. На четвертом уровне модели вычисляются: срок достижения максимальной концентрации на границе грунтовых вод, горизонтальная скорость распространения фронта загрязнения с грунтовыми водами, концентрация НП в грунтовых водах, радиус распространения НП с грунтовыми водами.

Временной интервал для максимальной концентрации на уровне грунтовых вод  $t_4$  вычисляется как сумма продолжительности времени полного впитывания НП в почву и времени полного впитывания НП в грунт:

$$t_4 = \begin{cases} \frac{h_2 + h_3}{v^3}, \text{ наземный тип аварии} \\ \frac{h_{\text{рез}}}{v^3}, \text{ подземный тип аварии} \end{cases} \quad (12)$$

Максимальное расстояние распространения фронта загрязнения от центра пролива НП с грунтовыми водами  $l_4$  вычисляется по следующей формуле:

$$l_4 = \frac{M_0 - (M_1 + M_2 + M_3)}{2R \cdot h_4 \cdot m_3 \cdot w_3 \cdot \frac{\delta_0}{\delta_b}} \quad (13)$$

где  $R$  – радиус пятна пролива (м).

Горизонтальная скорость распространения  $v_4$  фронта загрязнения с грунтовыми водами вычисляется по следующей формуле:

$$v_4 = \frac{h'_3 - h''_3}{l_4} \cdot \frac{k_b}{r_3} \quad (14)$$

Концентрация загрязнения в грунтовых водах  $C_4$  вычисляется по следующей формуле:

$$C_4 = \frac{M_0 - (M_1 + M_2 + M_3)}{2R \cdot l_4 \cdot h_4} \quad (15)$$

Для оценки адекватности модели проведены испытания на пяти объектах в Беларуси. В качестве объектов были выбраны нефтебазы и автозаправочные станции, на которых были зафиксированы аварийные проливы НП и проведены исследования по замеру концентраций Институтом природопользования. Предварительный анализ полученного с помощью ММП прогноза и результатов измерений показал, что при значительных расхождениях прогнозируемых и измеренных концентраций НП в отдельных точках, в целом прогноз ММП не противоречит общей реальной картине загрязнения. Аналогичные исследования в настоящее время проводятся на двух объектах (нефтепроводы) в Казахстане.

Модель находится в стадии доработки, в дальнейшем планируется ее расширение вводом дополнительной информации.

Работа выполнена в рамках совместного белорусско-казахстанского инновационного проекта «Разработка экспертной системы реабилитации геологической среды, загрязненной нефтепродуктами, на основе принципов самоорганизации для территорий государств-участников СНГ» Межгосударственной программы инновационного сотрудничества государств-участников на период до 2020 г.

Математическая модель является совместной разработкой специалистов Научно-производственного центра по геологии, Института природопользования национальной академии наук Беларуси и Белорусского государственного технологического университета.

#### Список использованных источников

1. Методика расчета минимальной оснащенности аварийно-спасательных служб (формирований) предназначенных для локализации и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на территории Российской Федерации, на континентальном шельфе и в исключительной экономической зоне Российской Федерации, Приложение 1 к Проекту приказа МЧС Российской Федерации. С. 4–5, 39.

2. Белькова, С. В. Определение ущерба окружающей среде при авариях на магистральных нефтепроводах / С. В. Белькова // Омск: ОмГТУ, 2010. С.14–18.

3. Гольдберг, В. М. Гидрогеологические основы охраны подземных вод от загрязнения / В. М. Гольдберг, С. Газда // М.: Недра, 1984. С. 262.

4. Михалева, Т. А. Отчёт о комплексной геолого-гидрогеологической инженерно-геологической съемке масштаба 1:50 000 для целей мелиорации водосбора рек Илия и Гайна (Плещеницкий участок) / Т. А. Михалева – 1978–1980. Отчет 921.

5. Методика прогнозирования миграции загрязняющих веществ в грунтовых водоносных горизонтах от автозаправочных станций, руководящий документ Республики Беларусь РД РБ 0212.1-98. – Минск, 1998.

6. Вагнер, А. В. Методика прогнозирования объема экологического загрязнения грунтов и грунтовых вод при проливе экологически вредных веществ / А. В. Вагнер, С. К. Бухарин, С. Г. Кочемасов и др. // ИСБ: Экологический вестник России. – № 5. – 2004. С. 45–51.

7. Огняник, Н. С. Основы изучения загрязнения геологической среды легкими нефтепродуктами / Н. С. Огняник, Н. К. Парамонова, А. Л. Брикс и др. – К.: [А.П.Н.], 2006. С. 278: ил. – Тит. л., аннот. парал. Англ.

8. Белоусова, А. П. / Экологическая гидрогеология: учебник для вузов / И. К. Гавич, А. Б. Лисенков, Е. В. Попов // М.: ИКЦ «Академкнига», 2006. С. 397.

Шляппо, Е. С. / Отчёт о комплексной геолого-гидрогеологической съёмке масштаба 1:50000 инженерно-геологическими исследованиями по водосборам низовьев рек Горыни, Ствиги и Уборти (Средне-Припятский участок) / Е. С. Шляппо, Е. К. Щурок – 1968-1970. Отчет 20.