

УДК 665.7:502.51:504.5

А. В. Бурмакова

Белорусский государственный технологический университет

**МОДЕЛЬ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ
О МЕТОДАХ РЕАБИЛИТАЦИИ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ,
ЗАГРЯЗНЕННОЙ НЕФТЕПРОДУКТОМ**

В статье представлена формальная модель экспертной системы поддержки принятия решения о выборе методов реабилитации геологической среды, загрязненной нефтепродуктом в результате аварийного пролива. Основой экспертной системы является математическая модель распространения нефтепродукта в геологической среде. Формальная модель экспертной системы состоит из пяти блоков, которые поэтапно выполняет вычисление характеристик процесса распространения нефтепродукта и их индикаторов, классификацию состояния геологической среды и генерацию идентификаторов мероприятий, направленных на реабилитацию геологической среды. Формальная модель описывает экспертную систему, которая может быть использована для принятия оперативного решения о выборе средств и методов реабилитации геологической среды, а также для разработки упреждающих мероприятий.

Ключевые слова: формальная модель, экспертная система, системы поддержки решений, нефтепродукт, экология.

Для цитирования: Бурмакова А. В. Модель экспертной системы поддержки принятия решения о методах реабилитации геологической среды, загрязненной нефтепродуктом // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. 2024. № 1 (278). С. 64–69.

DOI: 10.52065/2520-6141-2024-278-10.

A. V. Burmakova

Belarusian State Technological University

**MODEL OF AN EXPERT SYSTEM TO SUPPORT DECISION MAKING
OF REHABILITATION GEOLOGICAL ENVIRONMENT CONTAMINATED
WITH PETROLEUM PRODUCT**

The article presents a formal model of an expert system for supporting decision-making on the choice of methods for rehabilitating the geological environment contaminated with oil products as a result of an emergency spill. The basis of the expert system is a mathematical model of the distribution of petroleum products in the geological environment. The formal model of the expert system consists of five blocks, which step by step calculate the characteristics of the oil product distribution process and their indicators, classify the state of the geological environment and generate identifiers of activities aimed at rehabilitating the geological environment. The formal model describes an expert system that can be used to make operational decisions on the choice of means and methods for rehabilitating the geological environment, as well as to develop proactive measures.

Keywords: formal model, expert system, decision support systems, petroleum product, ecology.

For citation: Burmakova A. V. Model of an expert system to support decision making of rehabilitation geological environment contaminated with petroleum product. *Proceedings of BSTU, issue 3, Physics and Mathematics. Informatics*, 2024, no. 1 (278), pp. 64–69 (In Russian).

DOI: 10.52065/2520-6141-2024-278-10.

Введение. В литературе [1, 2] описана математическая модель распространения нефтепродукта в геологической среде, позволяющая оценивать и прогнозировать ее состояние. Модель является комплексной и охватывает процессы растекания нефтепродукта по поверхности, испарения, вертикальное его проникновение в почву и грунт до уровня грунтовых вод, а также горизонтальное перемещение нефтепродукта вместе с грунтовыми водами. Математическая модель позволяет вычислить значения характеристик

процесса распространения нефтепродукта в геологической среде.

Оценки значений характеристик процесса распространения нефтепродукта в геологической среде могут быть применены при принятии оперативного решения о методах устранения последствий уже произошедшей аварии, а также для оценки последствий возможной аварии с целью подготовки упреждающего плана оперативных мероприятий по устранению последствий пролива нефтепродукта.

Формально модель распространения нефтепродукта в геологической среде описывается как четверка:

$$\Omega \equiv \langle \Pi, N, \Gamma, X \rangle, \quad (1)$$

где Π – параметры пролива; N – параметры нефтепродукта; Γ – параметры геологической среды; X – характеристики процесса распространения нефтепродукта в геологической среде.

Модель предусматривает 28 параметров и 24 вычисляемые характеристики процесса распространения нефтепродукта в геологической среде. Критически важными для принятия решения о выборе методов и средств реабилитации геологической среды являются: глубина проникновения нефтепродукта в почву и грунт, срок достижения нефтепродуктом уровня грунтовых вод, а также срок достижения фронтом нефтепродукта, перемещающегося с грунтовыми водами заданных точек.

Модель распространения нефтепродукта в геологической среде послужила основой экспертной системы поддержки принятия решения о выборе методов реабилитации геологической среды, загрязненной нефтепродуктом в результате аварийного пролива [3]. Опыт разработки экспертной системы позволил сформулировать общие принципы устройства таких систем, которые удобно описать в виде модели.

В статье рассматривается модель, формально описывающая структуру класса экспертных систем, предназначенных для выбора экологически эффективных методов реабилитации геологической среды, загрязненной в результате аварийного пролива нефтепродукта.

Основная часть. Формальная модель экспертной системы поддержки принятия решения о выборе методов реабилитации геологической среды может быть представлена в виде пятерки:

$$\Sigma \equiv \langle \Omega, \Lambda, I, K, \Phi \rangle, \quad (2)$$

где Ω – модель процесса распространения нефтепродукта в геологической среде, Λ – система контролируемых значений характеристик процесса распространения нефтепродукта в геологической среде; I – система индикаторов характеристик процесса распространения нефтепродукта в геологической среде; K – система классификации состояния геологической среды; Φ – механизм формирования перечня мероприятий для реабилитации геологической среды, загрязненной нефтепродуктом.

Контролируемые значения Λ характеристик процесса описываются двойкой:

$$\Lambda \equiv \langle X', \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\} \rangle, \quad (3)$$

где $X' = \{\chi'_1, \chi'_2, \chi'_n\}$, $X' \subseteq X$ – подмножество $n = |X'|$ характеристик процесса; $\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\}$ –

множество контролируемых экспертной системой значений характеристик X' процесса распространения нефтепродукта в геологической среде, при этом величина $\lambda_i = (l_i^1, l_i^2, \dots, l_i^{m_i})$ является вектором размерности $m_i \geq 1$, представляющим собой набор контролируемых числовых значений характеристики $\chi'_i \in X'$, $i = \overline{1, n}$.

Система индикаторов I характеристик процесса распространения нефтепродукта в геологической среде описывается множеством функций:

$$I \equiv \{i_1(\chi'_1, \lambda_1), i_2(\chi'_2, \lambda_2), \dots, i_n(\chi'_n, \lambda_n)\}, \quad (4)$$

где $\{i_1(\chi'_1, \lambda_1), i_2(\chi'_2, \lambda_2), \dots, i_n(\chi'_n, \lambda_n)\}$ – множество функций $i_i(\chi'_i, \lambda_i)$, $i = \overline{1, n}$ двух аргументов: $\chi'_i \in X'$ – значение контролируемой характеристики процесса; λ_i – вектор контролируемых значений этой характеристики (формула (3)), при этом значение функции $i_i(\chi'_i, \lambda_i)$ будем называть индикатором значения контролируемой характеристики $\chi'_i \in X'$ процесса распространения нефтепродукта в геологической среде.

Система K классификации представлена в виде отображения:

$$K : (i_1, i_2, \dots, i_n) \rightarrow (k_1, k_2, \dots, k_m), \quad (5)$$

где в соответствие вектору (i_1, i_2, \dots, i_n) , $n = \overline{1, |X'|}$ значений индикаторов контролируемых характеристик $X' = \{\chi'_1, \chi'_2, \chi'_n\}$ ставится вектор (k_1, k_2, \dots, k_m) , $1 \leq m \leq n$, который будем называть классом состояния геологической среды.

Механизм Φ формирования перечня мероприятий для реабилитации геологической среды, загрязненной пролитым нефтепродуктом, представлен в виде отображения

$$\Phi : (k_1, k_2, \dots, k_m) \rightarrow (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_r), \quad (6)$$

ставящего в соответствие классу (k_1, k_2, \dots, k_m) состояния процесса вектор $(\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_r)$, представляющий собой упорядоченный перечень r идентификаторов мероприятий для реабилитации геологической среды, загрязненной пролитым нефтепродуктом.

На рисунке представлена схема вычислений в экспертной системе Σ . На схеме отображены четыре блока: Ω – блок вычисления характеристик процесса распространения нефтепродукта в геологической среде; I – блок вычисления индикаторов характеристик процесса, K – блок классификации состояния геологической среды и Φ – блок генерации последовательности идентификаторов мероприятий для реабилитации геологической среды, загрязненной нефтепродуктом. Входными данными системы Σ являются параметры математической модели Ω распространения нефтепродукта в геологической среде (Π – параметры пролива, N – параметры нефтепродукта, Γ – параметры геологической среды) и Λ – контролируемые значения характеристик процесса.

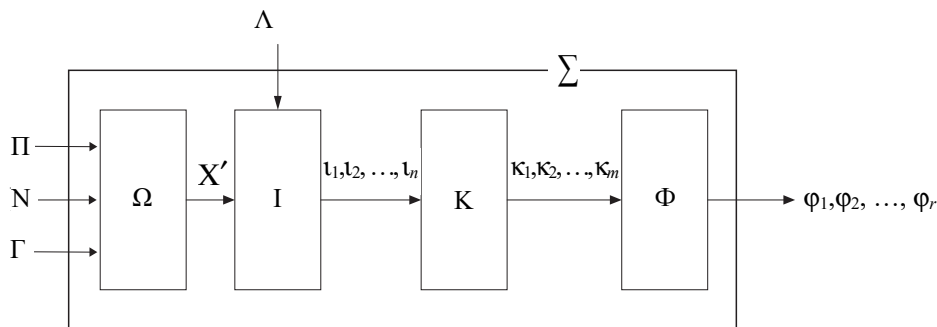


Схема вычислений в экспертной системе поддержки принятия решения о выборе методов реабилитации загрязненной нефтепродуктом геологической среды

Результатом работы экспертной системы является вектор $(\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_r)$ идентификаторов мероприятий для реабилитации геологической среды, загрязненной нефтепродуктом.

Значения параметров модели поступают на вход блока Ω , предназначенного для вычисления характеристик X' процесса распространения нефтепродукта в геологической среде. Подмножество $X' \subseteq X$ вычисленных в блоке Ω контролируемых характеристик процесса поступают в блок I, в котором на основе значений характеристик X' и контролируемых значений Λ вычисляются индикаторы $(\iota_1, \iota_2, \dots, \iota_n)$ этих характеристик. Блок K предназначен для классификации состояния геологической среды. Классификация осуществляется на основе поступивших на вход блока индикаторов характеристик процесса распространения нефтепродукта. Результатом вычислений в блоке K является вектор $(\kappa_1, \kappa_2, \dots, \kappa_m)$, определяющий класс состояния геологической среды. Вектор $(\kappa_1, \kappa_2, \dots, \kappa_m)$ поступает на вход блока Φ , осуществляющего генерацию последовательности $(\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_r)$ идентификаторов мероприятий для реабилитации геологической среды загрязненной нефтепродуктом.

Описание реализации экспертной системы [3] в соответствии с моделью экспертной системы $\Sigma \equiv \langle \Omega, \Lambda, I, K, \Phi \rangle$ может быть представлена как пятерка:

$$\Sigma' \equiv \langle \Omega', \Lambda', I', K', \Phi' \rangle, \quad (7)$$

где Σ' – реализация модели Σ (формула (2)), а $\Omega', \Lambda', I', K', \Phi'$ – реализации соответствующих компонентов $\Omega, \Lambda, I, K, \Phi$ модели (3)–(6).

Реализация Ω' модели Ω может быть представлена в форме четверки:

$$\Omega' \equiv \langle P', N, \Gamma', X' \rangle, \quad (8)$$

где $P' \subset P$ – подмножество параметров P пролива; N – параметры нефтепродукта; $\Gamma' \subset \Gamma$ – подмножество параметров Γ геологической среды; $X' \subset X$ – подмножество характеристик X процесса распространения нефтепродукта в геологической среде.

Параметры пролива P' в экспертной системе описываются четверкой:

$$P' \equiv \langle \Delta t, V_0, T_0^S, (x_0, y_0, z_0) \rangle, \quad (9)$$

где Δt – промежуток времени с момента пролива; T_0^S – средняя температура земной поверхности за промежуток времени Δt ; (x_0, y_0, z_0) – координаты центра пролива.

Параметры геологической среды Γ' в экспертной системе описываются четверкой:

$$\Gamma' \equiv \langle \Gamma'_1, \Gamma'_2, \Gamma'_3, \Gamma'_4 \rangle, \quad (10)$$

где $\Gamma'_1 \equiv \langle d_1, \gamma_1 \rangle$ – параметры поверхности пролива (d_1 – коэффициент растекания нефтепродукта по поверхности [4]; γ_1 – координаты точек окрестности пролива); $\Gamma'_2 \equiv \langle \hat{T}_2, h_2, u_2 \rangle$ – параметры почвенного слоя (\hat{T}_2 – нижняя граница среднего значения температуры поверхности пролива T_0^S за промежуток времени Δt , при котором осуществляется проникновение нефтепродукта в почву; h_2 – высота почвенного слоя; u_2 – нефтеемкость почвы [5]); $\Gamma'_3 \equiv \langle h_3, \rho_3, m_3, w_3, k_{b,3}, r_3 \rangle$ – параметры грунтового слоя (h_3 – высота грунтового слоя, ρ_3 – средняя плотность грунта [6], m_3 – пористость грунта, w_3 – капиллярная влагоемкость грунта, $k_{b,3}$ – коэффициент фильтрации воды в грунте [7], r_3 – коэффициент задержки нефтепродукта в грунте) [8]; $\Gamma'_4 \equiv \langle h_4, \rho_4, m_4, w_4, k_{b,4}, r_4, \gamma_4 \rangle$ – параметры слоя грунтовых вод (h_4 – высота слоя грунтовых вод, ρ_4 – средняя плотность грунта, m_4 – пористость грунта, w_4 – капиллярная влагоемкость грунта, $k_{b,4}$ – коэффициент фильтрации в слое грунтовых вод, r_4 – коэффициент задержки нефтепродукта в слое грунтовых вод, γ_4 – координаты точек на верхней границе слоя грунтовых вод).

Характеристики X' процесса распространения нефтепродукта в геологической среде, вычисляемые экспертной системой, описываются четверкой:

$$X' \equiv \langle X'_0, X'_1, X'_3, X'_4 \rangle, \quad (11)$$

где $X'_0 \equiv \langle M_0 \rangle$ – исходные характеристики процесса (M_0 – масса пролитого нефтепродукта);

$X'_1 \equiv \langle S_1, H_1, B_1 \rangle$ – характеристики поверхностного слоя (S_1 – площадь поверхностного пятна пролива, H_1 – толщина поверхностного пятна, B_1 – координаты границ наземного пятна пролива); $X_3 \equiv \langle M_3, \bar{M}_3, C_3, \hat{C}_3, H_3, v_3 \rangle$ – характеристики грунтового слоя (M_3 – масса нефтепродукта адсорбированного в грунте, \bar{M}_3 – максимальная масса нефтепродукта, которая может быть задержана в грунте, C_3 – концентрация нефтепродукта в почве, \hat{C}_3 – максимальная концентрация нефтепродукта в грунте, H_3 – максимальная глубина проникновения нефтепродукта в грунте, v_3 – скорость вертикального проникновения нефтепродукта в грунте); $X'_4 \equiv \langle C_4, \bar{M}_4, v_4, L_4 \rangle$ – характеристики слоя грунтовых вод (C_4 – концентрация нефтепродукта в грунтовых водах, \bar{M}_4 – максимальное значение массы нефтепродукта, которое может проникнуть в слой грунтовых вод, v_4 – скорость горизонтального проникновения нефтепродукта в слое грунтовых вод, L_4 – максимальное расстояние от края поверхностного пятна пролитого нефтепродукта до границы его распространения с грунтовыми водами).

Контролируемые значения Λ' характеристик процесса распространения нефтепродукта в геологической среде, применяемые в экспертной системе поддержки принятия решения о выборе методов реабилитации геологической среды, загрязненной нефтепродуктом в результате аварийного пролива, описываются двойкой:

$$\Lambda' \equiv \langle \{B_1, C_3, \bar{C}_3, H_3, C_4, L_4\}, \{\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6\} \rangle \quad (12)$$

где $\{B_1, C_3, \bar{C}_3, H_3, C_4, L_4\} \subset X$ – подмножество контролируемых характеристик процесса распространения нефтепродукта в геологической среде; $\lambda_i, i = \bar{1}, \bar{6}$ – контрольные значения соответствующих характеристик: $\lambda_1 = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k)$ – вектор контрольных значений для характеристики B_1 (координаты границ наземного пятна пролива), где $\theta_i(x_i, y_i)$ координаты k близлежащих природоохранных и водоохранных объектов, расположенных в радиусе $3S_1 / 2\pi$ от центра пролива; $\lambda_2 = \hat{C}_3$ – контрольное значение для характеристики C_3 (концентрация нефтепродукта в грунтовом слое), где \hat{C}_3 – предельно допустимая концентрация нефтепродукта в грунте; $\lambda_3 = \hat{C}_3$ – контрольное значение для характеристики \bar{C}_3 (максимально возможная концентрация нефтепродукта в грунтовом слое); $\lambda_4 = h_3$ – контрольное значение для характеристики H_3 (глубина проникновения нефтепродукта в грунт), где h_3 – высота грунтового слоя; $\lambda_5 = \hat{C}_4$ – контрольное значение для характеристики C_4 (концентрация нефтепродукта на уровне грунтовых вод, где \hat{C}_4 – предельно допустимая концентрация нефтепродукта на уровне грунтовых вод);

$\lambda_6 = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p)$ – вектор контрольных значений для характеристики L_4 (максимальное возможное расстояние горизонтального распространения фронта нефтепродукта от границы наземного пятна), где $\theta_i(x_i, y_i)$ координаты p близлежащих водоохранных объектов, расположенных в радиусе $10S_1 / 2\pi$ от центра пролива.

Система индикаторов I' характеристик процесса распространения нефтепродукта в геологической среде описывается следующим множеством функций: $v_1(B_1, (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k))$ – функция для вычисления индикатора характеристики B_1 (координаты границ наземного пятна пролива), функция зависит от двух аргументов: B_1 – координаты границ наземного пятна пролива и координаты k близлежащих природоохранных и водоохранных объектов, расположенных в радиусе $3S_1 / 2\pi$ от центра пролива; значением функции является целочисленное значение в пределах от 0 до k , равное количеству координат $\theta_i(x_i, y_i)$, расположенных в границах области ограниченной замкнутой ломаной B_1 ; $v_2(C_3, \hat{C}_3)$ – функция для вычисления индикатора характеристики C_3 (концентрация нефтепродукта в грунтовом слое), функция принимает два аргумента: C_3 – концентрация нефтепродукта в грунтовом слое, \hat{C}_3 – предельно допустимая концентрация нефтепродукта в грунте; результатом функции является значение $v_2 = C_3 / \hat{C}_3$; $v_3(\bar{C}_3, \hat{C}_3)$ – функция для вычисления индикатора характеристики \bar{C}_3 (максимально возможная концентрация нефтепродукта в грунтовом слое), функция принимает два аргумента: \bar{C}_3 – максимально возможная концентрация нефтепродукта в грунтовом слое, \hat{C}_3 – предельно допустимая концентрация нефтепродукта в грунте; результатом функции является значение $v_3 = \bar{C}_3 / \hat{C}_3$; $v_4(H_3, h_3)$ – функция для вычисления индикатора характеристики H_3 (глубина проникновения нефтепродукта в грунтовом слое), функция зависит от двух аргументов: H_3 – значение глубины проникновения нефтепродукта в грунтовый слой, h_3 – высота грунтового слоя; результатом функции является значение

$$v_4 = \begin{cases} 0, & H_3 < h_3, \\ 1, & H_3 = h_3; \end{cases}$$

$v_5(C_4, \hat{C}_4)$ – функция для вычисления индикатора характеристики C_4 (концентрация нефтепродукта на уровне грунтовых вод), функция принимает два значения: C_4 – значение концентрации нефтепродукта на уровне грунтовых вод, \hat{C}_4 – предельно допустимая концентрация

нефтепродукта на уровне грунтовых вод; результатом функции является значение $v_5 = C_4 / C_4$; $v_6(L_4, (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p))$ – функция для вычисления индикатора характеристики L_4 (максимальное возможное расстояние горизонтального распространения фронта нефтепродукта от границы наземного пятна), функция зависит от двух значений: L_4 – значение максимально возможного расстояния горизонтального распространения фронта нефтепродукта от границы наземного пятна, координаты p близлежащих водоохраных объектов, расположенных в радиусе $10S_1 / 2\pi$ от центра пролива; результатом функции является целочисленное значение в пределах от 0 до p , равное количеству координат $\theta_i(x_i, y_i)$, расположенных в радиусе $L_4 + S_1 / 2\pi$ от центра пролива.

Система K' классификации в экспертной системе реализована в виде отображения:

$$K' : (v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6) \rightarrow (k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6), \quad k_i = v_i, \quad i = \overline{1, 6}. \quad (13)$$

Механизм Φ' ($k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$) \rightarrow ($\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_k$) формирования перечня k мероприятий для реабилитации геологической среды, отображающий класс состояния ($k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$) геологической среды на множество идентификаторов мероприятий ($\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_k$) основывается на алгоритме обхода ориентированного дерева [9] $G = \langle V, E \rangle$ с множеством вер-

шин $V = \{v_0, v_1, \dots, v_n\}$ и множеством дуг $E = \{e_{i,j}\}, i, j = \overline{1, n}$, соединяющих вершины v_i и v_j .

Заключение. Главной особенностью представленной в статье формальной модели экспертной системы (2) является то, что результатом работы экспертных систем, реализующих эту модель, является не только оценка состояния загрязненной геологической среды, но и линейный алгоритм (результат работы блока Φ на рисунке), описывающий технологию ее реабилитации.

Структурно предлагаемая модель экспертной системы состоит из пяти независимых компонент. При разработке экспертной системы в соответствии с предложенной моделью каждый компонент может быть реализован независимо друг от друга, так как функционирование любого компонента зависит только от входных параметров.

Последовательное выполнение первых трех блоков схемы (вычисление характеристик и индикаторов, классификации), изображенной на рисунке, направлены на последовательную структуризацию данных о состоянии геологической среды.

Следует также обратить внимание: при реализации экспертной системы на основе формальной модели значения векторов индикаторов совпадают с классами состояния геологической среды (13). Такой подход оправдан при низкой вариации значений вектора индикаторов.

Список литературы

1. Бурмакова А. В., Смелов В. В., Захаров А. А. Реализация комплексной математической модели прогнозирования последствий аварийного пролива нефтепродуктов // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. 2018. № 1 (206). С. 82–87.
2. Бурмакова А. В., Ибрагим Ж. М., Смелов В. В. Применение экспертных оценок в комплексной математической модели прогнозирования последствий аварийного пролива нефтепродуктов // Труды БГТУ. Сер. 3, Физ.-мат. науки и информатика. 2018. № 2 (212). С. 96–100.
3. Смелов В. В., Оношко М. П., Захаров А. А. Экспертная система прогнозирования последствий пролива нефтепродуктов // Природопользование и экологические риски: материалы науч.-практ. конф., Минск, 5 июня 2019 г. Минск, 2019. С. 295–297.
4. Методика расчета минимальной оснащённости 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 приказу № 613, от 21 августа 2000 г., МЧС Российской Федерации. С. 4–5, 39.
5. Белькова С. В. Определение ущерба окружающей среде при авариях на магистральных нефтепроводах. Омск: ОмГТУ, 2010. С. 14–18.
6. Гольдберг В. М., Газда С. Гидрогеологические основы охраны подземных вод от загрязнения. М.: Недра, 1984. 262 с.
7. Огнянник Н. С. Основы изучения загрязнения геологической среды легкими нефтепродуктами. Киев: А.П.Н., 2006. С. 278.
8. Михалева Т. А. Отчет о комплексной геолого-гидрогеологической и инженерно-геологической съемке масштаба 1:50 000 для целей мелиорации в водосборах рек Илии и Гайны (Плещеницкий участок). Минск: Ин-т геолог. наук, 1978–1980. Отчет 921.
9. Гладков Л. А., Курейчик В. В., Курейчик В. М. Дискретная математика / под ред. В. М. Курейчика. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. 496 с.

References

1. Burmakova A. V., Smelov V. V., Zakharov A. A. Rehabilitation of the complex mathematical model of predicting the consequences of an emergency spill of oil products. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 3, Physics and Mathematics. Informatics, 2018, no. 1 (206), pp. 82–87 (In Russian).
2. Burmakova A. V., Ibragim Zh. M., Smelov V. V. Defenition: Application of expert assessments in a complex mathematical model for predicting the consequences of an emergency spill of oil products. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 3, Physics and Mathematics. Informatics, 2018, no. 2 (212), pp. 96–100 (In Russian).
3. Smelov V. V., Onoshko M. P., Zaharov A. A. Expert system for predicting the consequences of an oil spill. *Prirodopol'zovaniye i ekologicheskiye riski: materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Environmental management and environmental risks: materials of the scientific and practical conference]. Minsk, 2019, pp. 295–297 (In Russian).
4. Methodology for calculating the minimum equipment of rescue services (formations) intended for localization and liquidation of oil and oil products spills in the territory of the Russian Federation, on the continental shelf and in the exclusive economic zone of the Russian Federation: Appendix 1 to the Draft Order of the Ministry of Emergency Situations of the Russian Federation. 39 p. (In Russian).
5. Bel'kova S. V. *Opredeleniye ushcherba okruzhayushchey srede pri avariyaх na magistral'nykh nefteprovodakh* [Defenition: Determination of damage to the environment during accidents on main oil pipelines]. Omsk, OmGTU Publ., 2010, pp. 14–18 (In Russian).
6. Gol'dberg V. M., Gazda S. *Gidrogeologicheskiye osnovy okhrany podzemnykh vod ot zagryazneniya* [Defenition: Hydrogeological basis of protection of groundwater from pollution]. Moscow, Nedra Publ., 1984. P. 262 (In Russian).
7. Ognyanik N. S., Paramonova N. K., Briks A. L., Konnov P. V., Pashkovskiy I. S. *Osnovy izucheniya zagryazneniya geologicheskoy sredy legkimi nefteproduktami* [Fundamentals of studying the pollution of the geological environment with light oil products]. Kyiv, A.P.N. Publ., 2006. 278 p. (In Russian).
8. Mikhaleva T. A., Deruto G. V., Andrusenko N. Yu. *Otchet o kompleksnoy geologo-gidrogeologicheskoy i inzhenerno-geologicheskoy s"yemke masshtaba 1:50 000 dlya tseley melioratsii v vodosborakh rek Ilii i Gayny (Pleshchenitskiy uchastok)* [Report on a comprehensive geological and hydrogeological survey of a scale of 1:50 000 for the purposes of land reclamation in the watersheds of the rivers Iliya and Gayna (Pleshchenitskiy site)]. Minsk, In-t geolog. nauk Publ., 1978–1980. Report 921. RD RB 0212.1-98 (In Russian).
9. Gladkov L. A., Kureichik V. V., Kureichik V. M. *Diskretnaya matematika* [Discrete mathematics]. Ed. by V. M. Kureichik. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2014. 496 p. (In Russian).

Информация об авторе

Бурмакова Анастасия Владимировна – старший преподаватель кафедры информационных систем и технологий. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: burmakova@belstu.by

Information about the author

Burmakova Anastasyia Vladimirovna – Senior Lecturer, the Department of Information Systems and Technologies. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: burmakova@belstu.by

Поступила после доработки 26.01.2024