

УДК 504.064.36

DOI: 10.22213/2410-9304-2025-1-12-19

Организация биомониторинга химически опасных объектов с применением инструментов моделирования миграции загрязняющих веществ

Р. А. Галиакберов, аспирант, Ижевский нефтяной научный центр, Ижевск, Россия

И. М. Янников, доктор технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

В. А. Алексеев, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Статья посвящена описанию и научному обоснованию способа повышения эффективности работы системы биомониторинга химически опасных объектов с использованием идентификационных экологических полигонов (Янников И. М. Биомониторинг объектов по уничтожению химического оружия с использованием идентификационного полигона: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01 и 03.00.16. Ижевск, 2007. 210 с.). Авторами отмечено, что при обработке результатов данной системы биомониторинга не учитываются особенности рельефа местности и связанных с ними явлений миграции загрязняющих веществ. Для решения обозначенной проблемы авторами предлагается внедрение методов и способов моделирования миграции загрязняющих веществ (далее – 3В) на цифровых моделях рельефа (далее – ЦМР) территории в систему обработки результатов биомониторинга. Предложен способ организации биомониторинга химически опасных объектов (далее – ХОО) с использованием идентификационных экологических полигонов (далее – ИЭП) с применением инструментов моделирования миграции 3В в вертикальном и горизонтальном направлениях. При этом под моделированием путей вертикальной миграции 3В подразумевается моделирование процесса вымывания 3В, находящихся в атмосферном воздухе, в зоны влияния ХОО. Под моделированием горизонтальной миграции 3В подразумевается моделирование перемещения осадков в места понижения рельефа местности на ЦМР территории и их дальнейшее скопление на данных участках. На примере бывшего объекта по хранению и уничтожению химического оружия (далее – ОХУХО) проведено поэтапное описание способа организации биомониторинга ХОО (Патент № 2821839 РФ. Заявка № 2024103087 от 07.12.2024. Способ биологического мониторинга химически опасных объектов / Алексеев В. А., Янников И. М., Галиакберов Р. А., Телегина М. В., Козловская Н. В. Дата регистр. В Госреестре изобретений 26.06.2024 г.). Первый этап включает в себя задание и анализ исходных данных и граничных условий, в рамках которого осуществляется подбор ЦМР территорий либо создание собственной упрощенной ЦМР. Результаты оценки рельефа территории представляются в численном виде, исходные данные для проведения моделирования получают буквенные обозначения и единицы измерения. На втором этапе работы производится моделирование вертикальной миграции 3В путем проведения последовательного расчета количества 3В, вымываемого из атмосферного воздуха. Приводится графическое описание и расчет процесса поглощения. На третьем этапе осуществляется моделирование горизонтальной миграции 3В в почве. Конечным результатом проведения расчетов является выявление некоторого объема ячеек ЦМР территории, в котором происходит задержка 3В, что свидетельствует о достижении заданной цели. По итогам приведенного описания сделаны выводы о прогнозируемых результатах использования инструментов моделирования в системе биомониторинга с использованием ИЭП, заключающихся в обосновании системы расстановки пунктов (точек) пробоотбора, повышении точности и достоверности обработки результатов проведения биомониторинга.

Ключевые слова: химически опасные объекты, биомониторинг, идентификационный экологический полигон, цифровое моделирование рельефа территории, загрязняющие вещества, вертикальная и горизонтальная миграция, способ организации биомониторинга.

Введение

Вопрос обеспечения экологической безопасности опасных объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, в настоящее время становится все более актуальным.

Одним из важных и перспективных направлений в системе экологической безопасности по-прежнему остается совершенствование системы государственного и производственного экологического контроля, мониторинга за состоянием окружающей среды, а также прогнозирование экологической обстановки.

Дальнейшее совершенствование и развитие существующих систем экологического контроля и экологического мониторинга являются приоритетными задачами государства, закрепленными целым рядом законодательных и нормативных правовых актов (Конституция Российской Федерации, принята 12 декабря 1993 г., в редакции с внесенными в нее поправками от 30 декабря 2008 г.; Федеральный закон РФ от 07.21.1997 «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» № 116-ФЗ; Федеральный закон РФ от 10.01.2002 «Об охране окружающей среды» № 7-ФЗ; Федераль-

ный закон РФ от 30.03.1999 «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» № 52-ФЗ).

При этом в последнее время особое внимание уделяется проблемам автоматизированной обработки результатов экологического контроля и экологического мониторинга, о чем недвусмысленно свидетельствует принятое Правительством страны «Положение о федеральной государственной системе состояния окружающей среды» (утверждено Постановлением Правительства РФ от 19.03.2024 № 329).

Указанная информационная система призвана для содержания информации об источниках загрязнения, массе, уровне и (или) объеме выбросов и сбросов, результатах оценки оказанного воздействия, результатах работы системы государственного экологического мониторинга и контроля за состоянием окружающей среды.

Осуществление указанных видов деятельности невозможны без развитой инфраструктуры сбора, хранения, управления, автоматизирования, администрирования больших объемов информации, то есть анализа и обработки результатов экологического контроля и мониторинга, на основе которых должны осуществляться комплексное прогнозирование и моделирование состояния окружающей среды.

По результатам проведенного анализа существующих на сегодняшний день систем экологического мониторинга (Ашихмина Т. Я. Комплексный экологический мониторинг объектов хранения и уничтожения химического оружия: Теория, методика, практика: дис. ... д-ра техн. наук. Киров, 2002; Ашихмина Т. Я. Научно-методологические основы комплексного экологического мониторинга окружающей среды в районе объектов хранения и уничтожения химического оружия // Теоретическая и прикладная экология. 2007. № 2. С. 23–34; Габричидзе Т. Г. Многоступенчатая система экологического мониторинга объекта по хранению и уничтожению химического оружия : дис.... канд. тех. наук. Киров, 2002. 150 с.; Кузнецова Е. А. Виды, формы и методы экологического контроля. Сайт. МИП. URL: <https://advokat-malov.ru/ekologicheskoe-pravo/ponyatie-vidy-formy-i-metody-ekologicheskogo-kontrolya.html>; Федотова Л. А., Манаева Е. С., Сутункова М. П. О формировании и развитии системы государственного экологического мониторинга (государственного мониторинга окружающей среды). Сайт. Медицина труда и промышленная экология. № 12 (2023). URL: <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2023-63-12-766-773>; Шилов В. В.,

Маркова О. Л., Кузнецов А. В. Биомониторинг воздействия вредных химических веществ на основе современных биомаркеров. Обзор литературы // Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. Гигиена и санитария. URL: <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2019-98-6-591-596>), можно сказать, что в данный момент времени четко обозначена тенденция перехода от классического подхода к оценке состояния окружающей среды (который базируется на показателях предельно-допустимых концентраций (ПДК)), к методам и способам оценки непосредственной реакции окружающей природной среды на появление ЗВ – методам биологического мониторинга.

Подобные методы обладают намного большей степенью достоверности данных о состоянии окружающей природной среды, что обусловлено восприятием в качестве «индикаторов» общего состояния непосредственных ее составляющих [1–6].

Среди общего количества способов организации и проведения биомониторинга, особо выделяется биомониторинг с использованием ИЭП, разработанный и успешно апробированный в период работы объектов по хранению и уничтожению химического оружия исследователями научной школы Ижевского государственного технического университета (Янников И. М. Биомониторинг объектов по уничтожению химического оружия с использованием идентификационного полигона : дис. ... канд. техн. наук. Ижевск : ИжГТУ, 2007. 210 с.). При этом аналитика показывает, что совершенствование и развитие данного вида мониторинга возможна в части совершенствования обработки его результатов за счет использования инструментов моделирования миграции ЗВ на ЦМР территории. Это позволит поднять качество выполнения биомониторинга путем повышения точности и достоверности его результатов [7, 8].

Стоит отметить, что на сегодняшний день миграция ЗВ как в пределах одной составляющей окружающей среды, так и перемещение между составляющими, является довольно интересной темой для изучения. Большое количество факторов, оказывающих влияние на данные процессы, дает широкий простор для создания инструментов прогнозирования и моделирования данных процессов с целью выявления мест их накопления [9–14].

В рамках данной статьи описывается способ повышения эффективности работы системы биомониторинга химически опасных объектов

(далее – ХОО) с использованием ИЭП (Организация и ведение биомониторинга потенциально химически опасных объектов с применением идентификационных полигонов / [И. М. Янников и др.] ; под общ. ред. В. А. Алексеева. Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2013. 160 с. : ил.), заключающийся во внедрении в систему обработки результатов методов и способов моделирования миграции ЗВ на ЦМР территории. При этом под моделированием путей вертикальной миграции подразумевается моделирование процесса вымывания ЗВ, находящихся в атмосферном воздухе санитарно-защитной зоны (далее – СЗЗ) и зоны защитных мероприятий (далее – ЗЗМ) ХОО. Моделирование вымывания ЗВ из атмосферного воздуха осадками осуществляется по модели Д. А. Припачкина и А. К. Будыки [15]. Моделирование горизонтальной миграции подразумевает под собой моделирование путей перемещения осадков в места понижения рельефа местности и их скопление на данных участках.

Способ организации биомониторинга

Задание и анализ исходных данных и граничных условий

Исходя из конечной цели проводимого моделирования, основные расчеты миграции ЗВ (как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях) требуют наличия привязки к рельефу территории СЗЗ и ЗЗМ ХОО. Для решения данного вопроса предлагается использование ЦМР территории для наложения на них результатов всех проводимых расчетов. Таким образом, первым этапом проводимого моделирования является подбор ЦМР с необходимым и достаточным уровнем детализации либо создание собственной упрощенной ЦМР на основе топографических карт, содержащих информацию о рельефе, отметках высот, отметках урезов воды и т. д.

Создание собственной упрощенной ЦМР производится путем деления (разбиения) топографической карты на участки проведения расчетов на равные участки определенной длины L (м) и ширины B (м) (исходя из необходимого уровня детализации), при этом для удобства принимается, что $L=B$ (рис. 1).

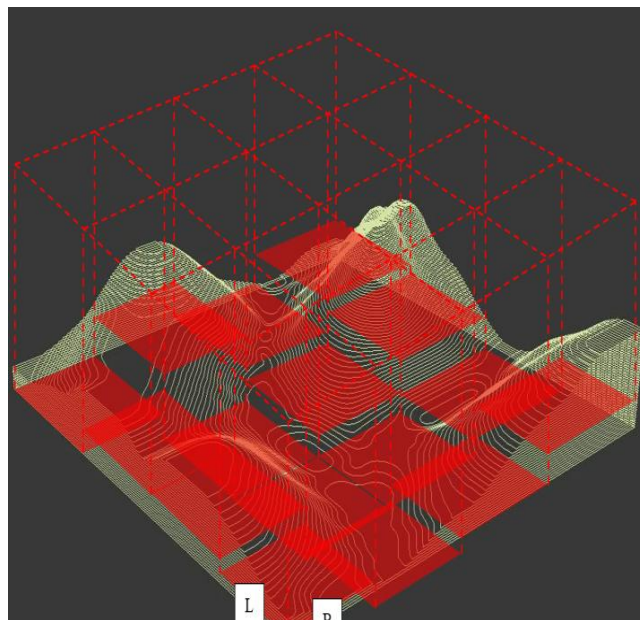


Рис. 1. Разбивка участка проведения расчетов

Fig. 1. Breakdown of the settlement area

После этого для каждой угловой точки, исходя из информации на топографической карте, производится оценка высоты рельефа в данной конкретной точке. Таким образом, топографическая карта приобретает вид массива данных, в котором индексы массива представляют собой координаты X и Y (м) (шаг координаты равен длине L и ширине B соответственно), а значения элементов массива – значения координаты Z (м) (табл. 1).

Таблица 1. Результаты оценки высоты рельефа в численном виде

Table 1. The results of the elevation estimation in numerical form

		Значение координаты X									
		0		$0+1 \times L$		$0+2 \times L$		$0+\dots \times L$		$0+N \times L$	
Значение координаты Y	0	Z_1	Z_2	Z_1	Z_2	Z_1	Z_2	Z_1	Z_2	Z_1	Z_2
		Z_3	Z_4	Z_3	Z_4	Z_3	Z_4	Z_3	Z_4	Z_3	Z_4
	$0+1 \times B$	Z_1	Z_2	Z_1	Z_2	Z_1	Z_2	Z_1	Z_2	Z_1	Z_2
		Z_3	Z_4	Z_3	Z_4	Z_3	Z_4	Z_3	Z_4	Z_3	Z_4
	$0+2 \times B$	Z_1	Z_2	Z_1	Z_2	Z_1	Z_2	Z_1	Z_2	Z_1	Z_2
		Z_3	Z_4	Z_3	Z_4	Z_3	Z_4	Z_3	Z_4	Z_3	Z_4
	$0+\dots \times B$	Z_1	Z_2	Z_1	Z_2	Z_1	Z_2	Z_1	Z_2	Z_1	Z_2
		Z_3	Z_4	Z_3	Z_4	Z_3	Z_4	Z_3	Z_4	Z_3	Z_4
	$0+N \times B$	Z_1	Z_2	Z_1	Z_2	Z_1	Z_2	Z_1	Z_2	Z_1	Z_2
		Z_3	Z_4	Z_3	Z_4	Z_3	Z_4	Z_3	Z_4	Z_3	Z_4

Стоит отметить, что, так как подобное деление территории СЗЗ и ЗЗМ, ХОО потребуются в дальнейшем (для проведения расчетов как вертикальной, так и горизонтальной миграции ЗВ), аналогичную операцию требуется провести и в случае наличия ЦМР необходимого уровня детализации. Отличием в данном случае является лишь автоматизация (в случае наличия ЦМР) оценки высоты рельефа для угловых точек или ее отсутствие (в случае работы с собственной упрощенной ЦМР).

После подготовки ЦМР к выполнению расчетов для каждой ячейки ЦМР производится задание исходных данных для дальнейшего проведения расчетов:

1. Концентрация капель в единичном объеме, $n(D)$ (1/м³).
2. Динамическая вязкость воды, μ_w (Па*с).
3. Число π .
4. Размер дождевой капли, D (м).
5. Коэффициент диффузии аэрозольных частиц в воздухе, D_{diff} (м²/с).
6. Поправка Каннингема на скольжение для аэрозольных частиц, C_s .
7. Размер аэрозольных частиц, d (м).
8. Концентрация ЗВ в атмосферном воздухе, $C(i)$ (мг/м³).
9. Скорость падения дождевой капли, u (D) (м/с).
10. Размер аэрозольного облака по вертикали, H (м).
11. Динамическая вязкость воздуха, μ (Па*с).
12. Интенсивность дождя, I (мм/ч).
13. Плотность воздуха, ρ_1 (кг/м³).
14. Критическое число Стокса, St^* .
15. Плотность аэрозольных частиц, ρ (кг/м³).

Моделирование вертикальной миграции загрязняющих веществ

Как было сказано ранее, под моделированием вертикальной миграции ЗВ подразумевается последовательный расчет количества ЗВ, которое вымывается из атмосферного воздуха каждой ячейки при условии прохождении сквозь нее заданной интенсивности дождя. Для этого, в первую очередь, для каждой ячейки необходимо провести расчет коэффициента вымывания ЗВ из атмосферы $\Lambda(i)$ (1/с) при прохождении дождя заданной интенсивности I (мм/ч) по формулам, представленным в выбранной ранее модели [3]:

1. Диаметр зацепления r :

$$r = \frac{d}{D}. \quad (1)$$

2. Число Шмидта Sc :

$$Sc = \frac{\mu}{\rho_1 D_{diff}}. \quad (2)$$

3. Число Рейнольдса Re для дождевой капли заданного диаметра D :

$$Re = \frac{\rho_1 D u(D)}{\mu}. \quad (3)$$

4. Число Стокса St :

$$St = \frac{\rho d^2 C_s u(D)}{9 \mu D}. \quad (4)$$

5. Плотность упаковки дождевых капель α :

$$\alpha = \frac{\pi D^3 n(D)}{6}. \quad (5)$$

6. Коэффициент, зависящий от макроскопических параметров фильтрующей среды γ :

$$\gamma = \frac{4 \alpha H}{\pi D}. \quad (6)$$

7. Коэффициент диффузионного захвата η_D :

$$\eta_D = \frac{4 \times (1 + 0,4 Re^{\frac{1}{2}} Sc^{\frac{1}{3}})}{Re \times Sc}. \quad (7)$$

8. Коэффициент захвата за счет сцепления аэрозольной частицы дождевой каплей η_{DK} :

$$\eta_{DK} = 4r \left\{ \frac{\mu}{\mu_w} + r(1 + 2Re^{\frac{1}{2}}) \right\}. \quad (8)$$

9. Коэффициент инерционного захвата η_{St} :

$$\eta_{St} = St - St^*. \quad (9)$$

10. Коэффициент захвата η :

$$\eta = \eta_{st} + \eta_D + \eta_{DK}. \quad (10)$$

11. Эффективность захвата ЗВ каплями дождя $E(D, d)$:

$$E(D, d) = 1 - e^{-\eta}. \quad (11)$$

12. Коэффициент вымывания ЗВ $\Lambda(d, D)$:

$$\Lambda(d, D) = \frac{3}{2 \times 0,7} E(D, d) I^{0,75}. \quad (12)$$

После оценки высотных отметок рельефа на основе результатов определения верхней границы проводимых расчетов H_{\max} (м), выставляемой на максимально возможном уровне высоты присутствия ЗВ в атмосферном воздухе, для каждой ячейки ЦМР осуществляется задание высот границ $h(i)_1, h(i)_2, h(i)_3, h(i)_4$ (м). При этом в обязательном порядке необходимо учитывать перепад высоты рельефа между каждой гранью каждой ячейки ЦМР и высотой рельефа $H_{ист}$ (м) в месте расположения источника выбросов ХОО, так как верхняя граница проводимых расчетов H_{\max} изначально задается для ячейки, в которой находится источник выбросов, и не изменяется для всех ячеек ЦМР. Таким образом, высота каждой грани ячейки вычисляется следующим образом:

$$h(i) = (H_{\max} - H_{ист}) + (H_{ист} - Z_i). \quad (13)$$

Далее для каждой ячейки производится непосредственный расчет количества ЗВ $N(i)_{\text{полг}}$ (мг), поглощаемого объемом $V(i)_{\text{ос}}$ (м³), проходящего через ячейку за заданный промежуток времени t (с). Расчет заключается в последовательном выполнении ряда операций для каждой ячейки по формулам (рис. 2):

1. Выбор наименьшего значения $h(i)_{\min}$ (м) и наибольшего значения $h(i)_{\max}$ (м) из $h(i)_1, h(i)_2, h(i)_3, h(i)_4$.

2. Расчет объема $V(i)_1$ (м³) параллелепипеда, ограниченного значением $h(i)_{\min}$.

3. Расчет объема $V(i)_2$ (м³) усеченного параллелепипеда.

4. Расчет общего объема ячейки $V(i)_{\text{яч}}$ (м³).

5. Расчет количества вещества $N(i)$ (мг), содержащего в атмосферном воздухе «ячейки» объемом $V(i)_{\text{яч}}$.

6. Расчет объема дождя $V(i)_{\text{ос}}$ (м³), проходящего через ячейку.

7. Расчет количества вещества $N(i)_{\text{погл}}$ (мг), поглощаемого из атмосферы при прохождении через «ячейку» объема дождя $V(i)_{\text{ос}}$.

8. Расчет концентрации ЗВ $C(i)_{\text{ос}}$ (мг/м³) в объеме выпавшего дождя $V(i)_{\text{ос}}$.

После выполнения подобного расчета для всех «ячеек» ЦМР, моделирование вертикальной миграции ЗВ можно считать выполненным. Далее производится моделирование горизонтальной миграции загрязняющих веществ.

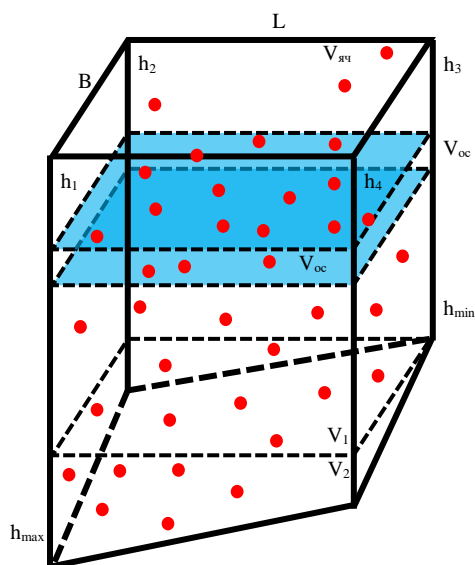


Рис. 2. Графическое описание и расчет процесса поглощения ЗВ для i -й ячейки

Fig. 2. Graphical description and calculation of the pollutant absorption process for the i -th «cell»

$$V(i)_1 = h(i)_{\min} \times B \times L. \quad (14)$$

$$V(i)_2 = \frac{(h(i)_{\max} - h(i)_{\min}) \times B \times L}{2}. \quad (15)$$

$$V(i)_{\text{яч}} = V(i)_1 + V(i)_2. \quad (16)$$

$$N(i) = V(i)_{\text{яч}} \times C_i. \quad (17)$$

$$V(i)_{\text{ос}} = (I \times 0,001) \times B \times L. \quad (18)$$

$$N(i)_{\text{(погл)}} = N_i \times \Lambda. \quad (19)$$

$$C(i)_{\text{(ос)}} = \frac{\left(\frac{N(i)_{\text{(погл)}}}{V_{\text{ос}}} \right)}{10}. \quad (20)$$

Моделирование горизонтальной миграции загрязняющих веществ

Моделирование горизонтальной миграции заключается в последовательном проведении расчетов по трем блокам:

1. Блок 1 – задание стартовых точек.

2. Блок 2 – расчет горизонтальной миграции в стартовых ячейках.

3. Блок 3 – расчет горизонтальной миграции в переходных ячейках.

Работа блока 1 направлена на выявление из общего числа ячеек тех, которые имеют наибольшую высоту в сравнении со всеми соседними ячейками. Для выполнения задачи для каждой ячейки производится расчет ее средней высоты рельефа $H(i)_{\text{ср}}$ по значениям $h(i)_1, h(i)_2, h(i)_3, h(i)_4$, после чего все ячейки сравниваются со всеми соседними ячейками. В случае если значение показателя $H(i)_{\text{ср}}$ рассматриваемой ячейки больше, чем аналогичный показатель у всех соседних ячеек, данной ячейке присваивается статус «Стартовая». Начиная с данных ячеек производится дальнейший расчет горизонтальной миграции ЗВ по блокам 2 и 3.

В блоке 2 производится расчет горизонтальной миграции в стартовых ячейках путем распределения выпавших осадков и количества ЗВ в равном количестве из стартовой ячейки по соседним. При этом, исходя из того, что в соседних ячейках уже присутствует некоторый объем осадков и количество ЗВ, расчет производится путем сложения распределенного объема выпавших осадков из стартовой ячейки с объемом выпавших осадков в соседней ячейке, а распределенного количества ЗВ из стартовой ячейки – с количеством ЗВ в соседней ячейке. После сложения соседним ячейкам присваиваются новые значения объема выпавших осадков и количества ЗВ, а стартовая ячейка далее исключается из дальнейшего расчета.

В блоке 3 производится расчет горизонтальной миграции в «переходных ячейках» по аналогичному правилу распределения объема выпавших осадков и количества ЗВ из каждой ячейки по соседним ячейкам (которые имеют меньшее или равное значение $H_{\text{ср}}$) в равном количестве. При этом в данном расчете не принимают участие ячейки, имеющие статус «Стартовая», а также ячейки, которые уже были рассчитаны (имеющие статус «Рассмотренная», присваиваемый после проведения расчета). Расчет производится, начиная с ячеек, имеющих наибольший показатель $H_{\text{ср}}$ среди нерассмотренных (выбор ячейки производится после каждого проведенного расчета), и заканчивается после проведения расчета в послед-

ней ячейке, имеющей статус нерассмотренная (рис. 3).

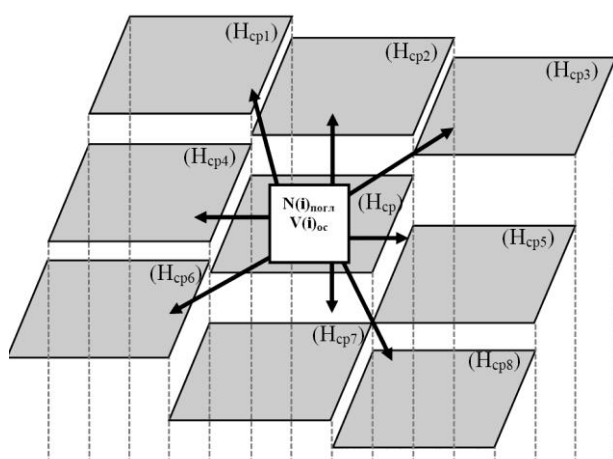


Рис. 3. Схема распределения объема выпавших осадков и ЗВ при расчете горизонтальной миграции в переходных ячейках

Fig. 3. The distribution scheme of the volume of precipitation and pollutants in the calculation of horizontal migration in «transition cells»

В конечном итоге результатом проведения расчетов становится выявление некоторого объема ячеек, осадки и ЗВ из которых не могут переместиться ни в одну из соседних ячеек. В данном случае расчет горизонтальной миграции загрязняющих веществ, а также моделирование в целом можно считать завершенным. Дальнейшая работа в соответствии с известными методами [16] проводится непосредственно над корректировкой системы расстановки идентификационных экологических полигонов, проведением мероприятий по биомониторингу, а также обработкой и анализом результатов его проведения.

Выводы

Как было обозначено ранее, основным недостатком существующей системы организации биомониторинга ХОО с использованием ИЭП является отсутствие учета явлений миграции ЗВ при обработке его результатов. Для решений указанного недостатка авторами предложено внедрение инструментов моделирования миграции ЗВ на ЦМР территории по описанному выше способу.

Проведение моделирования миграции ЗВ на ЦМР территории как перед проведением биомониторинга с использованием ИЭП, так и непосредственно в процессе его проведения, существенно повышает достоверность его результатов, а также позволяет повысить оперативность его проведения путем внесения корректировок в систему расстановки идентификационных экологических полигонов на территории СЗЗ и ЗЗМ ХОО.

Помимо этого, проведение моделирования миграции ЗВ на ЦМР позволяет уже на самых ранних стадиях жизненного цикла любого ХОО составить прогноз развития экологической обстановки на территории СЗЗ и ЗЗМ, выявить наиболее вероятные участки скопления ЗВ внутри СЗЗ и ЗЗМ, а также определить приблизительные концентрации ЗВ на этих участках, что в конечном итоге позволит повысить общий уровень экологической безопасности ХОО.

Библиографические ссылки

1. Янников И. М., Телегина М. В., Кузнецов Н. П. Методика оценки экологической ситуации загрязненных территорий // Интеллектуальные системы в производстве. 2020. № 1 (109). С. 28–32.
2. Уколов А. И., Радилов А. С. О развитии идей биологического контроля производственного воздействия вредных химических веществ (дискуссия) // Мед. труда и промышленная экология. 2022. № 11. С. 740–746.
3. Мониторинг природной среды : учеб. пособие. СПб. : Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2022. 176 с.
4. Шаммаков Г. Б., Назаров Н. Б. Применение химических технологий в экологическом мониторинге и контроле: Методы, технологии и перспективы // Символ науки. 2023. № 10-2. С. 30–31.
5. Лютяева Д. В. Применение метода биоиндикации при качественной оценке территорий с разной техногенной нагрузкой // Вестник магистратуры. 2020. № 5-5 (104). С. 15–20.
6. Покоева М. В., Ярославцев А. М. Экологические исследования смешанных насаждений методами дистанционного зондирования // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. 2020. № 3. С. 33–38.
7. Влияние процесса миграции загрязняющих веществ на экологическую обстановку в зоне влияния химически опасного объекта / Р. А. Галиакберов, И. М. Янников, В. А. Алексеев, М. В. Ершова // Интеллектуальные системы в производстве. 2024. Т. 22, № 2. С. 94–102.
8. Янников И. М., Галиакберов Р. А. К вопросу проведения экологического мониторинга в районах перепрофилированных объектов по уничтожению химического оружия // Экологические проблемы промышленных городов: сборник научных трудов по материалам 10-й Международной научно-практической конференции. Саратов : Амирит, 2023. С. 107–110.
9. Цифровые технологии в системе мониторинга окружающей среды на месторождениях твердых полезных ископаемых / О. М. Гуман, А. Б. Макаров, И. А. Антонова, Е. О. Вегнер-Козлова // Известия Уральского государственного горного университета. 2020. Вып. 2 (58). С. 97–102.
10. Сахно А. В., Лебедев С. А. Перспективы использования цифровой модели рельефа для решения прикладных задач геологии и геофизики // Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных

информационных технологий : материалы VI Международной научно-практической конференции. Ч. 2. Майкоп : ИП Кучеренко В.О., 2021. С. 93–100.

11. Ковалева Е. И., Демин В. В., Трофимов С. Я. Радиальная миграция нефтепродуктов в почвах о. Сахалин по материалам лабораторных лизиметрических экспериментов // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 2021. № 3. С. 70–78.

12. Прогнозирование вертикальной миграции ¹³⁷Cs чернобыльского происхождения в почвах плакорных и аккумулятивных агроландшафтов Плавского радиоактивного пятна / С. И. Спиридонов, В. В. Кречетников, И. Е. Титов, В. К. Кузнецов // Агрохимический вестник. 2022. №5. С. 77–82.

13. Федутин К. А. Интеллектуализация процессов принятия решений в организационных системах в условиях оперативного анализа мониторинговых данных : дис. ... канд. техн. наук: 2.3.4: защищена 26.01.2024: Федутин Константин Александрович. Воронеж, 2023. 21 с.

14. Аккумуляция и миграция тяжелых металлов в почвах и растениях в условиях антропогенного загрязнения городской среды / А. С. Петухов, Г. А. Кремлева, Г. А. Петухова, Н. А. Хритохин // Труды КарНЦ РАН. 2022. № 3. С. 53–66.

15. Припачкин Д. А., Будыка А. К. Влияние параметров аэрозольных частиц на их вымывание из атмосферы дождевыми каплями // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56, № 2. С. 203–209.

16. Янников И. М. Методы и системы автоматизации обработки результатов биологического мониторинга потенциально опасных объектов : монография. Самара : Изд-во СамНЦ РАН, 2020. 486 с. : ил.

References

1. Yannikov I.M., Telegina M.V., Kuznetsov N.P. [Methodology for assessing the environmental situation of contaminated areas]. *Intellectual'nye sistemy v proizvodstve*. 2020. No. 1. Pp. 28-32 (in Russ.).

2. Ukolov A.I., Radilov A.S. [On the development of ideas for biological control of industrial exposure to harmful chemicals (discussion)]. *Med. truda i promyshlennaja ekologiya*. 2022. No. 11. Pp. 740-746 (in Russ.).

3. *Monitoring prirodnoj sredy* [Monitoring of the natural environment: a textbook]. Saint Petersburg: Publishing house of St. Petersburg University, 2022. 176 p. (in Russ.).

4. Shammakov G.Y., Nazarov N.B. [Application of chemical technologies in environmental monitoring and control: Methods, technologies and prospects]. *Simvol nauki*. 2023. No. 10-2. Pp. 30-31 (in Russ.).

5. Lyutyaeva D.V. [Application of the bioindication method in the qualitative assessment of territories with different technogenic loads]. *Vestnik magistratury*. 2020. No. 5-5 (104). Pp. 15-20 (in Russ.).

6. Pokoeva M.V., Yaroslavl'tsev A.M. [Ecological studies of mixed plantings by remote sensing methods]. *Vestnik MGUL – Lesnoj vestnik*. 2020. No. 3. Pp. 33-38 (in Russ.).

7. Galiakberov R.A., Yannikov I.M., Alekseev V.A., Ershova M.V. [The influence of the migration process of pollutants on the environmental situation in the zone of influence of a chemically hazardous object]. *Intellectual'nye sistemy v proizvodstve*. 2024. Vol. 22, no. 2. Pp. 94-102 (in Russ.).

8. Yannikov I.M., Galiakberov R.A. *K voprosu provedeniya ekologicheskogo monitoringa v rajonah pereprofilirovannykh ob'ektov po unichtozheniju himicheskogo oruzhija* [On the issue of environmental monitoring in areas of repurposed facilities for the destruction of chemical weapons]. *Jekologicheskie problemy promyshlennykh gorodov: sbornik nauchnykh trudov po materialam 10-j Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Proc. Environmental problems of industrial cities: a collection of scientific papers based on the materials of the 10th International Scientific and Practical Conference]. Saratov: Amirit LLC, 2023. Pp. 107-110 (in Russ.).

9. Guman O.M., Makarov A.B., Antonova I.A., Wegner-Kozlova E.O. [Digital technologies in the environmental monitoring system at solid mineral deposits]. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*. 2020. Issue. 2 (58). Pp. 97-102 (in Russ.).

10. Sakhno A.V., Lebedev S.A. *Perspektivy ispol'zovaniya cifrovoj modeli rel'efa dlya resheniya prikladnykh zadach geologii i geofiziki* [Prospects for using a digital elevation model to solve applied problems of geology and geophysics]. *Fundamental'nye i prikladnye aspekty geologii, geofiziki i geojekologii s ispol'zovaniem sovremennykh informacionnykh tehnologij : materialy VI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Fundamental and applied aspects of geology, geophysics and geoecology using modern information technologies. Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference]. Part 2. Maykop: IP Kucherenko V.O. 2021. Pp. 93-100 (in Russ.).

11. Kovaleva E.I., Demin V.V., Trofimov S.Ya. [Radial migration of oil products in soils of Sakhalin Island based on materials of laboratory lysimetric experiments]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17. Pochvovedenie*. 2021. No. 3. Pp. 70-78 (in Russ.).

12. Spiridonov S.I., Krechetnikov V.V., Titov I.E., Kuznetsov V.K. [Forecasting vertical migration of ¹³⁷Cs of Chernobyl origin in the soils of upland and accumulative agrolandscapes of the Plavsk radioactive spot]. *Agrohimicheskij vestnik*. 2022. No. 5. Pp. 77-82 (in Russ.).

13. Fedutinov K.A. *Intellectualizacija processov prinjatija reshenij v organizacionnykh sistemah v usloviyah operativnogo analiza monitoringovykh dannyx : dis. ... kand. tehn. nauk* [Intellectualization of decision-making processes in organizational systems in the context of operational analysis of monitoring data dis.... Cand. of Technical Sciences]: 2.3.4: protected 01.26.2024: Fedutinov Konstantin Aleksandrovich. Voronezh, 2023. 21 p. (in Russ.).

14. Petukhov A.S., Kremleva G.A., Petukhova G.A., Khritokhin N.A. [Accumulation and migration of heavy metals in soils and plants under conditions of anthropo-

genic pollution of the urban environment]. *Trudy KarNC RAN*. 2022. No. 3. Pp. 53-66 (in Russ.).

15. Pripachkin D.A., Budyka A.K. [Influence of aerosol particle parameters on their leaching from the atmosphere by raindrops]. *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*. 2020. Vol. 56, no. 2. Pp. 203-209 (in Russ.).

16. Yannikov I.M. *Metody i sistemy avtomatizacii obrabotki rezul'tatov biologicheskogo monitoringa potencial'no opasnykh ob#ektov : monografija* [Methods and automation systems for processing the results of biological monitoring of potentially dangerous objects: monograph]. Samara: Publishing House of the Russian Academy of Sciences, 2020. 486 p. (in Russ.).

* * *

Biomonitoring of Chemically Hazardous Objects Using Pollutant Migration Modelling Tools

R. A. Galiakberov, Engineer, CJSC «Izhevsk Petroleum Research Center», Izhevsk, Russia

I. M. Yannikov, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

V. A. Alekseev, DSc in Engineering., Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

The article is devoted to the description and scientific substantiation of a method for the biomonitoring system efficiency improvement of chemically hazardous objects using identification environmental polygons. The authors noted that when processing the results of this biomonitoring system, the terrain features and the related pollutant migration are not taken into account.

To solve the above mentioned problem, the authors propose to implement methods and techniques for modeling pollutant migration (PP) on digital elevation models (DEM) of the territory into the system for processing biomonitoring results. A method for organizing biomonitoring of chemically hazardous objects (CHO) using identification ecological polygons (IEP) with the implementation of tools for PP migration modeling in vertical and horizontal directions is proposed. In this case, modeling the vertical migration paths of PP means modeling PP washing out from the atmospheric air of the CHO influence zone. Modeling the horizontal migration of PP means modeling the precipitation movement to places of terrain depression on the DEM of the territory and their further accumulation in these areas.

Using the example of a former chemical weapons storage and destruction facility (KSDH), a step-by-step description of the method for organizing biomonitoring of KSDH is provided.

The first stage includes the assignment and analysis of the initial data and boundary conditions where DEM territories are selected or the creation of its own simplified DEM is carried out. The results of the territory terrain assessment are presented in numerical form, the initial data for modeling are obtained by letter designations and units of measurement.

At the second stage of the work, the vertical migration of PP is simulated by sequentially calculating the amount of PP washed out of the atmospheric air. A graphical description and calculation of the absorption process are provided.

At the third stage, the modeling of horizontal migration of PP in the soil is carried out. The final result of the analysis is the identification of a certain DEM cell volume where there is a delay in PP, which indicates that the set goal has been achieved.

Based on the results of the above description, conclusions are drawn about the results predicted by using modeling tools in the IEP biomonitoring system, which consist in substantiating the system of placing sampling points (points), increasing the accuracy and reliability of biomonitoring result processing.

Keywords: chemically hazardous objects, biomonitoring, identification ecological landfill, digital modeling of the terrain, pollutants, vertical and horizontal migration, method of biomonitoring organization.

Получено: 25.11.24

Образец цитирования

Галиакберов Р. А., Янников И. М., Алексеев В. А. Организация биомониторинга химически опасных объектов с применением инструментов моделирования миграции загрязняющих веществ // Интеллектуальные системы в производстве. 2025. Т. 23, № 1. С. 12–19. DOI: 10.22213/2410-9304-2025-1-12-19.

For Citation

Galiakberov R.A., Yannikov I.M., Alekseev V.A. [Organization of biomonitoring of chemically hazardous objects using pollutant migration modeling tools]. *Intel'ktual'nye sistemy v proizvodstve*. 2025, vol. 23, no. 1, pp. 12-19 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2025-1-12-19.