

Математическая модель для прогнозирования последствий выброса опасных химических веществ в окружающую среду

ISSN 1996-8493

DOI:10.54234/CST.19968493.2023.20.2.76

© Технологии гражданской безопасности, 2023

В.А. Акимов, Е.О. Иванова, С.В. Колеганов

Аннотация

В статье представлено математическое описание основных прогнозных параметров выброса опасных химических веществ в окружающую среду: мощность выброса и концентрация опасных химических веществ. Эта статья завершает серию публикаций в научно-техническом журнале «Технологии гражданской безопасности» по прогнозно-аналитическим решениям, основанным на байесовских классификаторах, по природным, техногенным и биолого-социальным угрозам жизнедеятельности населения муниципальных образований.

Ключевые слова: выброс опасных химических веществ в окружающую среду; прогнозно-аналитическая модель; основные входные данные; мощность выброса; концентрация опасных химических веществ; показатель качества воздуха; анализ статистических данных, основанный на байесовском методе.

Mathematical Model for Predicting the Consequences of Hazardous Chemicals Release into the Environment

ISSN 1996-8493

DOI:10.54234/CST.19968493.2023.20.2.76

© Civil Security Technology, 2023

V. Akimov, E. Ivanova, S. Koleganov

Abstract

The article presents mathematical description of the main forecast parameters of hazardous chemicals release into the environment: emission power and concentration of hazardous chemicals.

This article completes a series of publications in the scientific and technical journal "Civil Security Technology" on predictive and analytical solutions based on Bayesian classifiers on natural, man-made and bio-social threats to the municipalities population life.

Key words: release of hazardous chemicals into the environment; predictive and analytical model; basic input data; emission power; concentration of hazardous chemicals; air quality indicator; analysis of statistical data based on the Bayesian method.

12.12.2022

Введение

«Выброс опасных химических веществ (ОХВ) в окружающую среду может происходить в результате аварии на химически опасном объекте, а также нарушения норм выброса при различных технологических процессах на производстве. При этом масштабные аварии на химически опасных объектах являются одними из наиболее вредных технологических катастроф, которые могут привести к массовому отравлению и гибели людей и биологических активов, значительному экономическому ущербу и тяжелым экологическим последствиям» [1].

«В рамках государственного экологического контроля осуществляются наблюдение за качеством атмосферного воздуха, оценка и прогноз изменения состояния окружающей среды под воздействием природных и антропогенных факторов. Однако не все муниципальные образования и городские округа обеспечены постами мониторинга, способными в режиме реального времени получать информацию о превышении нормативных показателей контролируемых ОХВ, давать качественную и точную оценку последствий выброса ОХВ» [2].

Поэтому разработка методики прогнозной и аналитической модели «Выброс опасных химических веществ в окружающую среду» (ПАМ-ОХВ) является важной научно-практической задачей при прогнозировании и возникновении кризисных ситуаций и происшествий, обусловленных угрозой выброса ОХВ в окружающую среду с превышением нормативных показателей [3].

«Наиболее перспективным методом создания ПАМ-ОХВ является комплексное применение математической модели с возможностями использования при расчетах только тех ее входных параметров, которые могут быть определены и автоматически высчитаны заранее, и байесовских сетей — вероятностно-графовых моделей, функционирующих в условиях неопределенности знаний, предназначенных для исследования вероятностных причинно-следственных связей между событиями в области обеспечения безопасности жизнедеятельности населения на контролируемых территориях» [4].

Основными входными данными для формирования базового обучающего множества ПАМ-ОХВ являются следующие группы параметров [5]: «параметры систем (постов) мониторинга выброса ОХВ, расположенных по периметру промышленных объектов, на которых имеются источники выбросов ОХВ; параметры систем (постов) мониторинга выброса ОХВ, расположенных на НТ; характеристики метеорологической обстановки; характеристики источников выброса ОХВ и параметров выброса ОХВ».

«В ПАМ-ОХВ вероятностной оценке с использованием байесовского классификатора подлежат следующие параметры: мощность выброса и концентрация ОХВ в месте размещения системы (поста) мониторинга выброса ОХВ» [6].

1. Прогноз мощности выброса опасных химических веществ

Для оценки уровня загрязнения атмосферного воздуха и влияния качества воздуха на здоровье населения на территории муниципального образования в зависимости от полученной концентрации выброса ОХВ используется общий показатель качества воздуха (Safe City Air Quality Index — далее SCAQI).

Показатель качества воздуха SCAQI для каждого ОХВ (фенол, формальдегид, аммиак) определяется по формуле:

$$SCAQI_i = \left(\frac{C_i}{\text{ПДК}_{\text{м.р.и}}} \right)^{k_i}, \quad (1)$$

где:

C_i — концентрация i -го ОХВ в атмосферном воздухе в месте размещения системы (поста) мониторинга выброса ОХВ, мг/м³;

$\text{ПДК}_{\text{м.р.и}}$ — предельно допустимая концентрация максимально-разовая, i -го ОХВ, мг/м³;

k_i — безразмерный коэффициент: 1,3 — для фенола и формальдегида; 0,85 — для аммиака.

Тогда общий показатель качества воздуха (SCAQI) можно определить по формуле:

$$SCAQI = \sum_{i=1}^3 \left(\frac{q_{\text{ср.и}}}{\text{ПДК}_{\text{м.р.и}}} \right)^{k_i}. \quad (2)$$

Качественная характеристика общего показателя SCAQI представляет собой шкалу от 1 до 13+ для обозначения уровня риска для здоровья, связанного с качеством воздуха на территории муниципального района, и определяется по табл. 1.

Таблица 1
Шкала уровня угрозы загрязнения воздуха SCAQI

SCAQI	Уровень загрязнения воздуха	Категория загрязнения воздуха
0-5	Уровень 1	Низкая
5-6	Уровень 2	Повышенная
7-13	Уровень 3	Высокая
>13	Уровень 4	Очень высокая

Скорость и дальность переноса загрязнения зависят от турбулентности воздуха и существующего во время эмиссии загрязнения ветрового поля.

В ПАМ-ОХВ расчетная концентрация ОХВ в месте размещения системы (поста) мониторинга выброса ОХВ определяется по стационарной модели Гаусса:

$$C(x, y, z, t) = \frac{q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \times \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] \times \left\{ \exp\left[-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\}, \quad (3)$$

где:

$C(x, y, z, t)$ — концентрация ОХВ в точке с координатами x, y, z в момент времени t , мг/м³;

q — мощность выброса из источника, г/с;

h — высота источника выброса ОХВ, м;

u — средняя скорость ветра, м/с;

σ_y — горизонтальная дисперсия, м;

σ_z — вертикальная дисперсия, м;

ось y — поперечно-горизонтальное направление;

ось z — направлена вертикально вверх;

ось x — горизонтальное направление, совпадает с направлением ветра;

начало системы координат — координаты источника выброса.

$$q = \frac{2\pi i \sigma_y \sigma_z C(x, y, z, t)}{\exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] \times \left\{ \exp\left[-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\}} \quad (4)$$

Определение мощности выброса по формуле (4) осуществляется относительно системы (поста) мониторинга выброса ОХВ, расположенной по периметру соответствующего промышленного объекта, с максимальным значением концентрации ОХВ среди значений, полученных со всех систем (постов), расположенных по периметру промышленного объекта, по состоянию на время проведения расчетов.

Заключение

Таким образом, в статье представлено краткое описание математической модели для прогнозирования последствий выброса опасных химических веществ в окружающую среду с использованием метода Байеса. В этой модели вероятностной оценке с использованием байесовского классификатора подлежали следующие параметры: мощность выброса и концентрация ОХВ в месте размещения системы (поста) мониторинга выброса ОХВ

Другие прогнозно-аналитические решения, основанные на байесовских классификаторах, представлены в других статьях научно-технического журнала

2. Прогноз концентрации опасных химических веществ

Концентрация ОХВ определяется в местах размещения систем (постов) мониторинга выброса ОХВ, используя их координаты.

Значения дисперсий σ_y, σ_z рассеяния задаются в зависимости от класса устойчивости атмосферы (табл. 2). Каждому классу устойчивости соответствуют определенные значения скорости ветра u , степени дневной инсоляции и ночной облачности (табл. 3).

Мощность выброса от предполагаемого источника выброса ОХВ определяется по формуле:

Таблица 2

Значения дисперсий σ_y, σ_z для расстояний 100–10000 м в условиях города и открытой местности

Класс устойчивости атмосферы Паскуилла	Состояние устойчивости	σ_y (м)	σ_z (м)
<i>Открытая местность</i>			
A	Сильнеустойчивое (1)	$0,22x(1+0,0001x)^{-1/2}$	$0,2x$
B	Неустойчивое (2)	$0,16x(1+0,0001x)^{-1/2}$	$0,12x$
C	Слабонеустойчивое (3)	$0,11x(1+0,0001x)^{-1/2}$	$0,08x(1+0,0002x)^{-1/2}$
D	Равновесное (4)	$0,08x(1+0,0001x)^{-1/2}$	$0,06x(1+0,0015x)^{-1/2}$
E	Слабоустойчивое (5)	$0,06x(1+0,0001x)^{-1/2}$	$0,03x(1+0,0003x)^{-1}$
F	Устойчивое (6)	$0,04x(1+0,0001x)^{-1/2}$	$0,016x(1+0,003x)^{-1}$
<i>Городская местность</i>			
A–B	Неустойчивое (1–2)	$0,32x(1+0,0004x)^{-1/2}$	$0,24x(1+0,001x)$
C	Слабонеустойчивое (3)	$0,22x(1+0,0004x)^{-1/2}$	$0,2x$
D	Равновесное (4)	$0,16x(1+0,0004x)^{-1/2}$	$0,14x(1+0,0003x)^{-1/2}$
E–F	Устойчивое (5–6)	$0,11x(1+0,0004x)^{-1/2}$	$0,08x(1+0,0015x)^{-1/2}$

Таблица 3

Классы устойчивости атмосферы Паскуилла

Скорость ветра на высоте 10 м, м/с	Степень инсоляции днем			Облачность ночью, баллы	
	сильная	умеренная	слабая	10 (общая) или > 5 (нижняя)	<4 (нижняя)
<2	A	A-B	B	–	–
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	D	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

«Технологии гражданской безопасности», а именно: по природным угрозам — в [7–10], по техногенным авариям — в [11–14]; биолого-социальным происшествиям — в [15].

Общие выводы

1. Научная новизна разработанных моделей заключается в едином научном подходе к их созданию, а именно: в применении метода статистической обработки, основанного на теореме Байеса.

2. Для научного прогнозирования кризисных ситуаций и происшествий с использованием метода Байеса и байесовских сетей требуется большое количество актуальных данных для моделирования аварий, катастроф и стихийных бедствий, что характерно для часто повторяющихся негативных событий.

3. Ввиду отсутствия статистических данных методы Байеса не применимы для прогнозирования катастрофических чрезвычайных ситуаций природного, техногенного и биолого-социального характера, происходящих редко, но со значительным ущербом.

Литература

- Акимов В. А. Исследование чрезвычайных ситуаций природного, техногенного и биолого-социального характера современными научными методами / В. А. Акимов, М. В. Бедило, С. П. Суцев. М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2021. 179 с. EDN: WUKXKS.
- Акимов В. А. Приложение общей теории безопасности к исследованию чрезвычайных ситуаций природного, техногенного и биолого-социального характера // Технологии гражданской безопасности. 2021. Т. 18. № 5. С. 13–28. DOI 10.54234/CST.19968493.2021.18.5.2.13. EDN: LRYKFU.
- Методика прогнозной и аналитической модели «Выброс химически опасных веществ в окружающую среду». М.: ООО НЦИ, 2021. 229 с.
- Предварительный национальный стандарт Российской Федерации ПНСТ 771-2022 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Безопасный город. Прогнозирование последствий выброса опасных химических веществ в окружающую среду. Общие требования. Утв. приказом Росстандарта от 6 декабря 2022 г. № 128-пнт.
- Акимов В. А., Иванова Е. О., Мишурный А. В. АПК «Безопасный город»: исходные данные для прогнозирования последствий выброса химически опасных веществ в окружающую среду // Гражданская защита. 2022. № 7 (563). С. 53–54.
- Прогнозно-аналитические решения по природным, техногенным и биолого-социальным угрозам единой системы информационно-аналитического обеспечения безопасности среды жизнедеятельности и общественного порядка «Безопасный город» / В. А. Акимов, А. В. Мишурный, О. В. Якимюк [и др.]. М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2022. 315 с. EDN: MGXNYI.
- Акимов В. А. Опасные гидрологические явления и процессы как источники чрезвычайных ситуаций природного характера: вербальная модель / В. А. Акимов, М. В. Бедило, С. П. Суцев // Технологии гражданской безопасности. 2021. Т. 18. № 4(70).— С. 4–8. DOI 10.54234/CST.19968493.2021.18.4.70.1.4. EDN: EVUUFU.
- Акимов В. А. Опасные метеорологические явления и процессы как источники чрезвычайных ситуаций природного характера: вербальная модель / В. А. Акимов, М. В. Бедило, С. П. Суцев // Технологии гражданской безопасности. 2021. Т. 18. № 4 (70).— С. 14–18. DOI 10.54234/CST.19968493.2021.18.4.70.3.14. EDN: QFYBPS.
- Акимов В. А. Опасные геофизические явления и процессы как источники чрезвычайных ситуаций природного характера: модель среднесрочного прогнозирования землетрясений / В. А. Акимов, М. В. Бедило, Е. О. Иванова // Технологии гражданской безопасности. 2022. Т. 19. № 1 (71). С. 20–23. DOI 10.54234/CST.19968493.2022.19.1.71.4.20. EDN: QICTLF.
- Акимов В. А. Крупные природные пожары как источники чрезвычайных ситуаций природного характера / В. А. Акимов, М. В. Бедило, Е. О. Иванова // Технологии гражданской безопасности. 2022. Т. 19. № 2 (72). С. 11–13. DOI 10.54234/CST.19968493.2022.19.2.72.2.11. EDN: PGJCMG.
- Акимов В. А. Аварии на системах электроснабжения: определение индекса приоритета восстановления электроснабжения / В. А. Акимов, А. В. Мишурный // Технологии гражданской безопасности. 2022. Т. 19. № 4 (74). С. 44–47. EDN: RWBXUK.
- Иванова Е. О. Аварии на системах теплоснабжения: вероятностная оценка развития последствий отказов на тепловой сети / Е. О. Иванова, А. В. Мишурный // Технологии гражданской безопасности. 2022. Т. 19. № 4 (74). С. 48–50. EDN: ZYZBAW.
- Акимов В. А. Математическая модель для прогнозирования последствий разлива нефти и нефтепродуктов / В. А. Акимов, Е. О. Иванова, А. В. Мишурный // Технологии гражданской безопасности. 2023. Т. 20. № 1 (75). С. 68–70. EDN: BGDHOAH.
- Акимов В. А. Математическая модель для прогнозирования последствий сброса жидких технологических отходов в гидросферу / В. А. Акимов, С. В. Колеганов, А. В. Мишурный // Технологии гражданской безопасности. 2023. Т. 20. № 1 (75). С. 71–73. EDN: VPENQV.
- Акимов В. А. Математические модели эпидемий и пандемий как источников чрезвычайных ситуаций биолого-социального характера / В. А. Акимов, М. В. Бедило, Е. О. Иванова // Технологии гражданской безопасности. 2022. Т. 19. № 3 (73). С. 10–14. EDN: IPFEND.

Сведения об авторах

Акимов Валерий Александрович: д. т. н., проф., засл. деятель науки РФ, ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), гл. н. с. института. Москва, Россия. SPIN-код: 8120-3446.

Иванова Екатерина Олеговна: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), с. н. с. науч.-исслед. центра. Москва, Россия. SPIN-код; 5483-4886.

Колеганов Сергей Викторович: МЧС России, начальник отдела Департамента образовательной и научно-технической деятельности, подполковник. Москва, Россия. SPIN-код: 2676-1470.

Information about authors

Akimov Valery A.: ScD (Technical Sc.), Professor, Honored Scientist of the Russian Federation, All-Russian Research Institute for Civil Defense and Emergencies, Chief Researcher of the Institute. Moscow, Russia. SPIN-scientific: 8120-3446.

Ivanova Ekaterina O.: All-Russian Research Institute for Civil Defense and Emergencies, Senior Researcher, Research Center. Moscow, Russia. SPIN-scientific: 5483-4886.

Koleganov Sergey V: EMERCOM of Russia, Head of Section of the Department of Educational and Scientific and Technical Activities. Moscow, Russia. SPIN-scientific: 2676-1470.