

УДК 004.942

DOI: 10.15587/1729-4061.2018.151650

Разработка геомодели определения концентрации опасных химических веществ в атмосфере

К. А. Тамер

Проведено критичний аналіз підходів до розробки моделі визначення концентрації небезпечних хімічних речовин (НХВ) у атмосфері, які є основою комп'ютерних систем екологічного моніторингу (КСЕМ). Встановлено, що недостатня ефективність функціонування існуючих КСЕМ визначається недосконалістю використовуваних в їх складі моделей визначення концентрації НХВ в атмосфері. Крім того, органічним недоліком таких систем є їх відомча приналежність і, як наслідок, обмеженість кола потенційних користувачів. Для підвищення ефективності функціонування обговорюваного класу систем запропонована концепція комплексного використання, в рамках КСЕМ, елементів інформаційно-аналітичних систем моніторингу навколишнього середовища, засобів обробки супутникових зображень, геоінформаційних технологій, а також математичного забезпечення для розрахунків концентрацій різних видів НХВ в атмосфері. Побудова КСЕМ на основі такої концепції надасть змогу істотно підвищити ефективність їх функціонування в аспектах скорочення часу на формування рішень, а також зниження ризику прийняття невірних рішень. При цьому математичне забезпечення КСЕМ має в своїй основі «гауссову» статистичну модель розповсюдження різних видів НХВ в атмосфері, що слугує, поряд із геоінформаційними технологіями, для синтезу геомоделі забруднення приземного шару атмосфери НХВ. В якості ілюстративного прикладу розглянута ситуація викиду НХВ (фреона-12) в районі м. Біла Церква (Київська область, Україна).

Наведені теоретичні результати є методичною основою для реалізації прикладної інформаційної технології створення, розгортання та експлуатації системи підтримки прийняття рішень щодо ліквідації наслідків надзвичайної ситуації, обумовленої поширенням НХВ у атмосфері

Ключові слова: небезпечні хімічні речовини, геоінформаційна система, геомодель, інформаційно-аналітична система, моніторинг атмосфери

1. Введение

Негативное влияние окружающей среды на состояние здоровья людей, вследствие техногенной нагрузки, в последние годы многократно усилилось. Одним из важнейших факторов такого воздействия является загрязнение атмосферы опасными химическими веществами (ОХВ), такими как зола, промышленная пыль, оксид цинка, смолы, оксид и диоксид азота, аммиак, хлористый водород и т. п.

подавляющее большинство современных компьютерных систем экологического мониторинга (КСЭМ) находятся в ведомственном подчинении. КСЭМ

ориентированы на комплексную оценку текущего состояния потенциально опасных объектов (ПОО) [1] и аварийных ситуаций на этих объектах, связанных с загрязнением окружающей среды ОХВ [2, 3].

При этом системы базового мониторинга (как правило, наземные), способны отслеживать фоновое содержание в воздухе очень ограниченной номенклатуры ОХВ. Таким образом, задействованные в настоящее время компьютерные системы мониторинга загрязнения атмосферы имеют ряд недостатков, которые существенно снижают их эффективность.

К этим недостаткам следует отнести, в первую очередь, направленность на поддержку принятия решений только в экстремальных условиях, и, в силу ведомственной принадлежности, ограниченность круга потенциальных пользователей таких систем.

На сегодняшний день в большинстве стран мира разработан и действует классификатор ПОО, на основе которого проведена паспортизация всех ПОО. Кроме того, разработаны и реализованы в виде программно-инструментальных средств методики расчета практически всех рисков опасности, в частности и тех, которые связаны с загрязнением атмосферы ОХВ. Методика ТОКСИ-3 и др. С другой стороны, на сегодняшний день сохраняет свою актуальность проблема создания эффективных средств оценки рисков, определяющих степень уязвимости населения вследствие загрязнения атмосферы ОХВ.

Сочетание в рамках современных информационно-аналитических систем мониторинга окружающей среды средств обработки спутниковых изображений с геоинформационными технологиями и математическим обеспечением даст возможность обеспечить качественно новый уровень функционирования таких систем. Наряду с этим, эффективность информационно-аналитических систем мониторинга окружающей среды была бы намного выше, если бы КСЭМ имели выход в гипермедийную среду. Доступ к информации многих пользователей позволил бы адекватно оценивать не только коллективный, но и индивидуальный уровень уязвимости, а также значительно снизить стоимость эксплуатации систем мониторинга состояния атмосферы.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Вопросам информатизации процессов мониторинга состояния окружающей среды, в частности атмосферы, с использованием средств спутникового мониторинга и геоинформационных технологий, посвящены работы [4–8]. Так, в работе [4] предложено использование специальных таблиц, в которых указаны нормативные значения параметров веществ, представляющих опасность для окружающей среды вообще и для человека в частности. Авторы публикаций [5–8] описывают разработанные ими методики расчета площади заражения и концентрации ОХВ. При этом в указанных публикациях отсутствуют результаты, пригодные для создания универсальных методических и программных средств оценки распространения ОХВ, в каждом случае авторы рассматривают частные сценарии развития чрезвычайной ситуации.

Поскольку процессы распространения ОХВ в атмосфере имеют непрерывный характер, они адекватно представимы в форме системы дифференциальных уравнений. При этом необходим учет значительного количества факторов, описывающих условия внешней среды, что на практике приводит к представлению модели в форме системы уравнений высоких порядков, для которых отсутствуют вычислительные методы, гарантирующие существование и единственность решения. Представление же рассматриваемых процессов логико-динамическими уравнениями невозможно в силу слабой структурированности данных процессов, что приводит к необходимости использования технологий искусственного интеллекта [9]. Авторы указанной работы предложили в качестве методической базы создаваемой КСЭМ применить искусственные нейронные сети. В качестве же компонентов модели авторами предложено использовать экспертные и нечеткие системы, генетические алгоритмы, фракталы, элементы когнитивной компьютерной графики. Авторами обсуждаемой работы не описаны конкретные модели и технологии, в которых реализуются соответствующие идеи. Вместе с тем, эффективное решение задач прогнозирования аварий и их последствий играет важную роль при принятии решений. В современной научной литературе такие задачи слабо представлены и, как правило, на общетеоретическом уровне. Например, в работе [10] описан процесс макропрогнозирования информационных индексов экологической безопасности с использованием нейросетевой модели, а в [11] предложены модели для осуществления мониторинга ПОО на основе логико-вероятностного моделирования. Результаты первой из указанных работ дают возможность сделать выводы о степени опасности проживания в регионе, модели же, предложенные в [11], позволяют оценить риски возникновения чрезвычайной ситуации и возможные сценарии действий ЛПР.

Значительная часть современных работ в рассматриваемой области посвящена исследованию предельных уровней концентрации взрывоопасных веществ. В частности, в работе [12] установлена нижняя концентрационная граница возгорания, то есть минимальное содержание горючего в смеси «горючее вещество-окислительная среда». Авторы работы [13] полагают, что если концентрация меньше такого предела, то условия ведения технологического процесса должны быть безопасными. В [14] предложено решение такой же задачи для открытых территорий. Автор указанных выше работ акцентируют внимание на прогнозировании будущих событий, при этом вопросы, связанные с оценкой точности и корректировкой прогнозов остаются вне поля зрения исследователей.

Прогнозирование концентрации ОХВ в атмосфере сопровождается значительной неопределенностью. Для количественного описания процесса распространения ОХВ на сегодня известны три подхода, основанные на использовании: гауссовских или дисперсионных моделей; моделей рассеивания, в которых используются интегральные законы сохранения массы в облаке при залповых выбросах, сюда же относятся так называемые модели «тяжелого газа», а также модели прямого численного моделирования.

В гауссовских моделях вводят ряд эвристик для определения коэффициентов, описывающих атмосферную турбулентность. Сами модели описывают два процесса в атмосфере – ветер и рассеивание ОХВ за счет атмосферной турбулентности. Недостатком таких моделей является сравнительно низкая точность оценивания концентрации ОХВ вблизи места выброса. Динамика распространения ОХВ в атмосфере при выбросе намного сложнее, чем это представляется в гауссовских моделях, поскольку в данном типе моделей не учитываются приведенные течения и повышенная, по сравнению с атмосферным воздухом, плотность ОХВ. Поэтому разработаны специальные модели, в которых учитываются соответствующие особенности ОХВ и которые названы моделями рассеивания "тяжелого газа". Известны реализации таких моделей: методика Всемирного банка [15], HGGYSTEM [16], представленные в ГОСТ Р12.3.047-98 [17], методика РД 52.04.253-90 [18]. Общими недостатками перечисленных выше методических средств являются завышенные реальные последствия аварий.

Таким образом, к нерешенным на данный момент проблемам создания КСЭМ для оценки последствий техногенных и экологических аварий и катастроф, связанных с распространением ОХВ в атмосфере, следует отнести:

1. Отсутствие единого подхода к разработке методической базы и практическому внедрению технологий, учитывающих как непрерывную динамику изменения состояния окружающей среды, так и субъективизм лица, принимающего решения (ЛПР).

2. Отсутствие методики предотвращения аварий и катастроф путем прогнозирования чрезвычайных ситуаций.

3. Отсутствие элементов сценарного анализа и, как следствие, принятие решений по факту аварии, когда в критической обстановке существенно возрастают риски принятия ЛПР неверных решений.

4. В случае принятия решений коллективом экспертов, необходимость учета различного уровня компетентности лиц, участвующих в этом процессе, что не всегда удается.

Из перечисленных выше проблем наиболее значимой является на данный момент первая, поскольку отсутствие методического базиса препятствует эффективному преодолению остальных. При этом особенности химических аварий и их последствий определяет необходимость решения научно-технической проблемы прогнозирования концентрации ОХВ во всей зоне заражения. Для решения указанной проблемы необходимо получить модели, позволяющие определять поля концентрации ОХВ во всей возможной зоне заражения или значения концентрации ОХВ в конкретных точках.

3. Цель и задачи исследования

Цель исследования заключается в повышении эффективности процесса определения концентрации ОХВ в атмосфере на основе совершенствования компьютерной системы экологического мониторинга. Это позволит проводить анализ и оценку уровня уязвимости населения вследствие загрязненности атмосферного воздуха опасными химическими веществами.

Достижение поставленной цели связано с необходимостью решения следующих задач:

- синтезировать на основе методов эволюционного моделирования методику прогнозирования концентрации опасных химических веществ в послеаварийный период;

- разработать специальную геомодель на основе объединения аналитических методов и геоинформационных технологий, для точного определения опасных зон при выбросах ОХВ в атмосферу;

- проиллюстрировать результат применения синтезированной методики для создания ядра, в форме геомодели, компьютерной системы экологического мониторинга, на примере оценивания распространения ОХВ после химической аварии в районе г. Белая Церковь, Украина.

4. Материалы и методы исследования особенностей процесса определения концентрации ОХВ в атмосфере

На содержательном уровне задача исследования заключается в прогнозировании концентрации ОХВ в послеаварийный период на основе предварительной доаварийной структурной и параметрической идентификации моделей концентрации ОХВ и уточнении по результатам нескольких измерений ее значения.

Для реализации сформулированной выше задачи необходимо создать систему прогнозирования концентрации ОХВ в послеаварийный период, что дает возможность, на основе этой информации, рационально распределить ресурсы для ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций.

Поскольку определение концентрации ОХВ осуществляется в послеаварийный период, критичность условий, ответственность за принятые решения, не позволяет использовать комплекс обоснованных мероприятий по минимизации последствий аварии. Для объективизации таких решений необходимо пользоваться как мониторинговыми, так и прогнозными данными.

Прогнозирование последствий аварии происходит в условиях неопределенности, вызванной их внезапностью и критичностью процессов принятия решений. На практике различают оперативный, тактический и стратегический виды прогнозирования.

В первом случае (оперативного прогнозирования), определяют масштабы аварии и предполагаемые последствия в ближайшее время (3–5 часов). Тактическое прогнозирование призвано дать ответы на вопросы о зоне заражения, необходимость эвакуации людей, возможный ущерб и действия оперативно-спасательных служб. Определение времени ликвидации последствий аварии, ее влияния на окружающую среду, количественного и качественного состава технических средств составляет предмет стратегического прогнозирования. Необходимо также реализовать постпрогнозирование или уточнение значений параметров химической аварии в послеаварийный период.

Поскольку традиционно релевантные задачи прогнозирования в данном случае решаются с применением известных методик, в основе которых лежит

принцип усреднения результатов, то в каждой ситуации, которая является уникальной, получить точные результаты зачастую невозможно. В данном случае необходимо использовать модели, в которых бы были адекватно представлены особенности окружающей среды. Очевидно, что построение таких моделей должно базироваться на учете экспертного опыта.

Модели для определения концентрации ОХВ идентифицируются в доаварийный период и очевидно, что результаты моделирования не в полной мере будут отражать особенности конкретной аварии. Осуществить уточнение можно было бы с учетом незначительного количества измерений в послеаварийный период, поскольку измерения в любом случае проводятся. В этом случае имеется возможность рационального переобучения модели в ускоренном режиме. Кроме того, результаты измерений позволят уточнить начальные значения параметров аварии, которые задаются для расчетов с использованием модели эмпирически. Особенности решения задачи требуют использования соответствующего математического аппарата, который бы дал возможность осуществлять учет экспертных заключений и ускоренную коррекцию модели концентрации ОХВ.

Поскольку выходные точные значения параметров аварии неизвестны, то эти параметры определяются в результате экспертных выводов. На их основании принимаются последующие решения. Очевидно, что если точность таких выводов низкая, то и эффективность принимаемых решений будет невысокой. Поэтому необходимо осуществлять точечные измерения концентрации ОХВ в реперных точках, и на их основании осуществлять коррекцию процессов принятия решений.

В период времени, предшествующий аварии, необходимо идентифицировать зависимость

$$C = F(P), \quad (1)$$

где C – концентрация ОХВ, P – вектор параметров и факторов.

При этом P имеет следующую структуру:

$$P = (x_0, y_0, z_0, t_0, x, y, z, t, M, W, D, T, V, R, U), \quad (2)$$

где (x_0, y_0, z_0, t_0) – координаты точки и времени возникновения аварии, (x, y, z, t) – координаты точки, в которой определяется концентрация ОХВ, и подходящее время; другие параметры аварии заданы константами.

Еще одним аспектом проблемы прогнозирования распространения ОХВ в атмосфере является вероятность многократного превышения предельно допустимой концентрации ОХВ в атмосфере. В связи с этим целесообразно учитывать общие положения теории катастроф [19]. Динамика соответствующего процесса представлена на рис. 1.

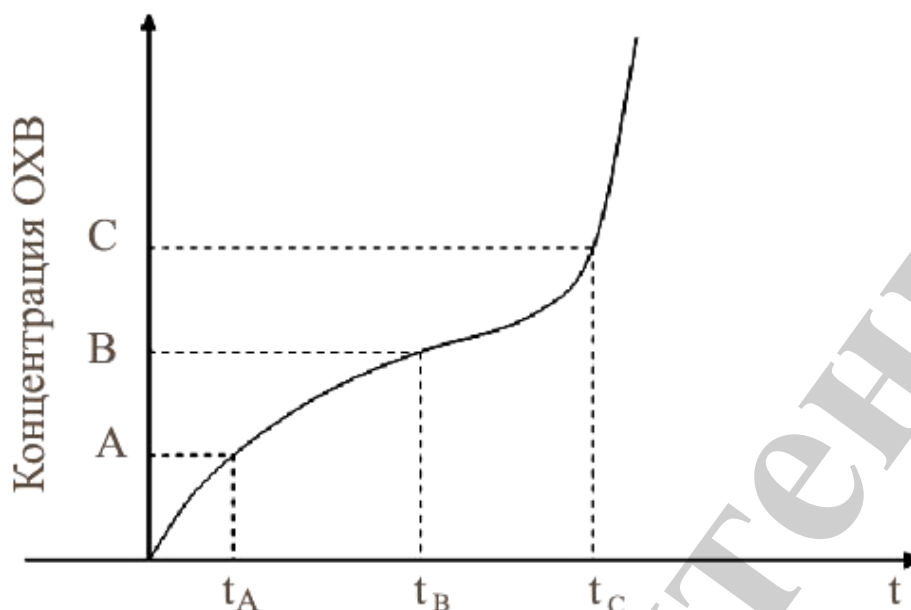


Рис. 1. Динамика концентрации ОХВ в атмосфере

На рис. 1 точками отмечен ряд событий, имеющих место при распространении ОХВ в атмосфере. Событие *A* – концентрация ОХВ достигла опасного уровня и необходимо проводить мероприятия по ее сокращению. Событие *B* – точка, предшествующая катастрофе, поскольку в момент времени t_B катастрофу, в большинстве случаев, остановить невозможно вследствие инерционности процесса роста концентрации опасного вещества. Событие *C* – точка катастрофы, после которой рост концентрации вещества имеет форму квадратичной или экспоненциальной зависимости.

Осуществляя формирование базы данных, необходимо учитывать то, что процессы на участках $(0, t_A)$, (t_A, t_B) , (t_B, t_C) , (t_C, \dots) , имеют размытый характер. Учет характерных особенностей и опыта экспертов, позволяют осуществлять управляющие воздействия с целью предотвращения катастроф.

Существующие методики определения расчета зон распространения ОХВ дают возможность рассчитать размеры и площадь зоны заражения, время подхода облака зараженного воздуха к определенному объекту, время поражающего действия и возможных потерь.

Еще одной проблемой является изменение характера погодных условий в зоне распространения ОХВ (рис. 2).

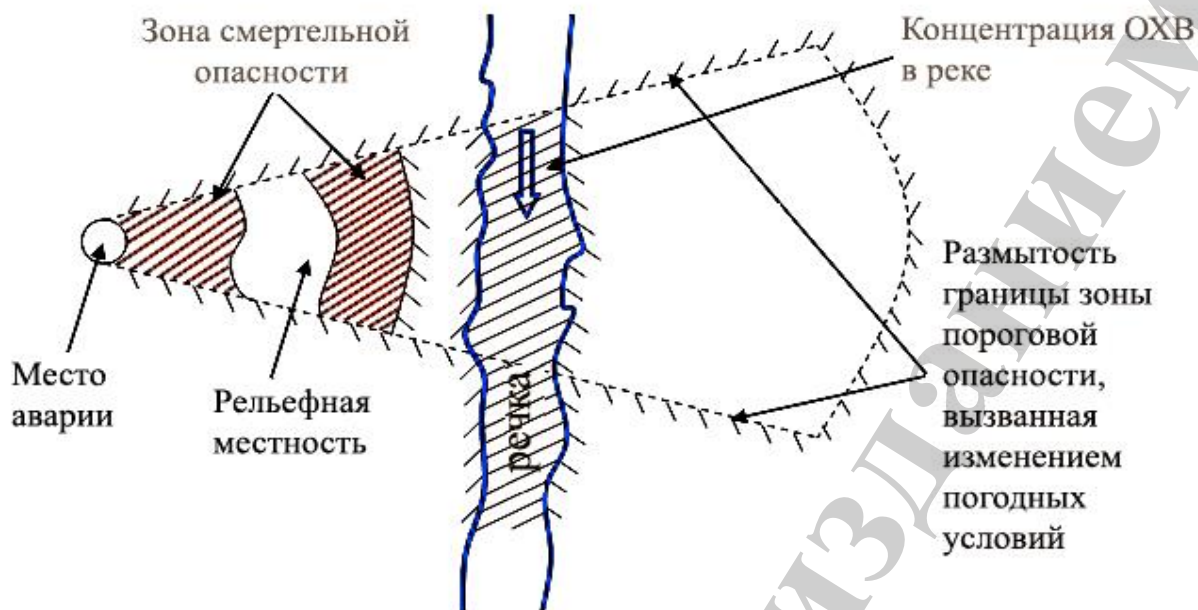


Рис. 2. Зона загрязнения опасными химическими веществами

Математическое моделирование процессов переноса ОХВ в атмосфере базируется на учете таких характеристик как параметры источников выброса, направление и скорость ветра на момент выброса, характер рельефа и застройки местности.

Процесс распространения выбросов в атмосфере происходит за счет адвентации переноса ОХВ воздушными массами и диффузии, обусловленной как физическими свойствами ОХВ, так и турбулентностью воздушных масс. Наблюдение за облаком выброса показывают, что сначала облако на выходе из источника подхватывается воздушными массами на определенную высоту с постепенным его расширением при удалении от источника в результате мелкомасштабной турбулентности потоков. Затем, постепенно увеличиваясь, облако выброса распадается на изолированные вихревые образования, переносимые на значительные расстояния от источника. Газообразные яды, которые попадают в атмосферу, могут вступать между собой в фотохимические реакции.

4. 1. Синтез геомодели для определения опасных зон при выбросах ОХВ в атмосферу

В основу разработанной технологии синтеза геомодели загрязнения приземного слоя атмосферы выбросами ОХВ положена математическая модель рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере [20].

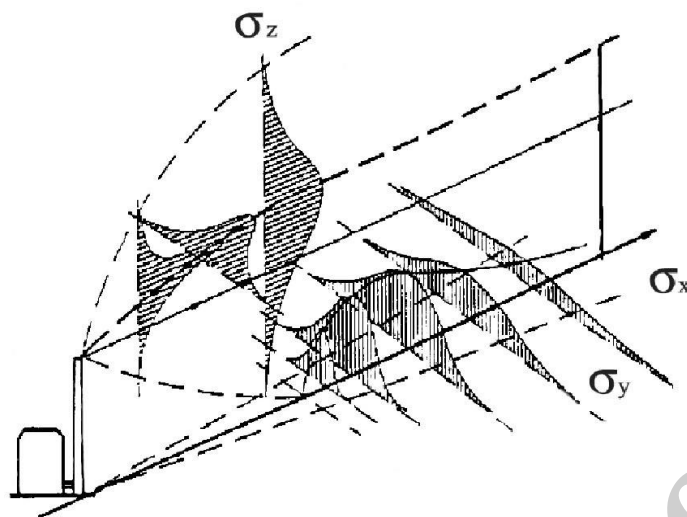


Рис. 3. Представление модели факела выброса ОХВ в пространстве

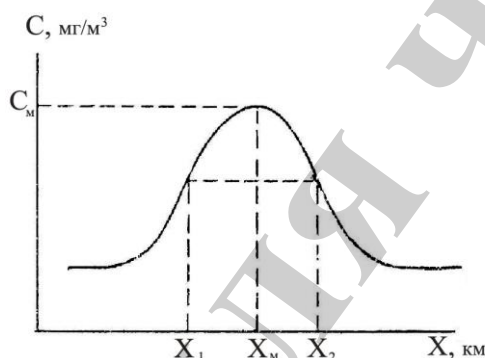


Рис. 4. Представление модели факела выброса ОХВ на плоскости

В этой модели сосредоточена информация о наземном источнике выброса ОХВ, который представлен как круглое отверстие с 20–30 минутным осреднением утечки. В этом случае максимальное значение концентрации ОХВ c_M (мг/м³) достигается на расстоянии x_M (м) от источника и определяется формулой:

$$c_M = \frac{AMFm\eta}{H^2 \sqrt[3]{V_1 \Delta T}}, \quad (3)$$

где A – коэффициент температурной стратификации атмосферы; M (г/с) – масса ОХВ, вытекающей в единицу времени; F – безразмерный коэффициент, учитывая скорость оседания ОХВ в атмосферном воздухе; m и n – коэффициенты условий утечки ОХВ; H (м) – высота источника выброса над уровнем земли, для наземных источников $H=2$ м; η – безразмерный коэффициент влияния рельефа местности; ΔT (°C) – разница между температурой выброса ОХВ T_r и температурой атмосферного воздуха T_a ; V_1 (м³/с) объем ОХВ попадая в атмосферный воздух за 1 сек. Значения

отдельных коэффициентов рассчитывают по формулам и таблицам, приведенным в [1].

При отсутствии ветра и значении $\eta = 1$ характер пространственного распределения концентрации определенного вида ОХВ проиллюстрирован на рис. 5.

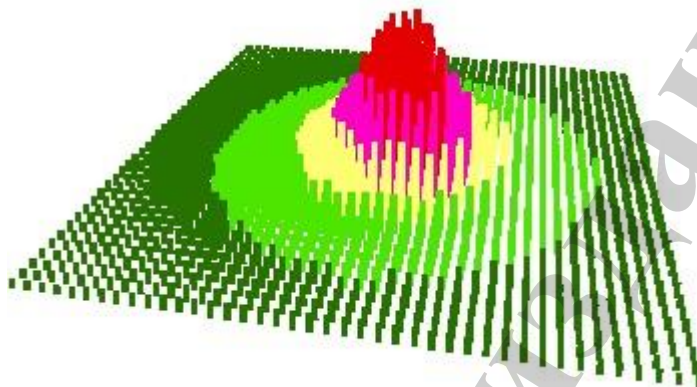


Рис. 5. Распределение концентраций ОХВ в приземном слое атмосферы

В двухмерном измерении такой характер распределения концентрации ОХВ, в приземном слое атмосферы при условии отсутствия ветра и на равнинной местности без зданий и лесных насаждений с перепадом высот до 50 м на 1 км.

При синтезе математической модели [20] необходимо учитывать параметры факторов, которые влияют на закономерности распространения в атмосферном воздухе ОХВ, а именно: характер рельефа, особенности застройки местности, направление и скорость приземного ветра. При этом, пространственное распределение концентрации ОХВ будет существенно отличаться от концентрических кругов, и иметь форму факела выброса.

Направление оси факела выброса зависит от направления ветра, а распределение концентраций ОХВ вдоль и поперек оси – от его скорости.

Исходные данные, направление и скорость ветра, определяют по данным многолетних наблюдений на метеорологических станциях, распространенных в соответствующей местности.

4. 2. Методика прогнозирования концентрации опасных химических веществ в послеаварийный период на основе методов эволюционного моделирования

Указанные выше обстоятельства определяют необходимость разработки специальной методики расчета, на основе гауссовой модели, концентрации ОХВ в атмосфере, в отдельных точках зоны распространения. Такая методика была разработана с использованием эволюционного моделирования в форме направленной оптимизации.

В основе метода направленной оптимизации лежит идея оптимизации процесса случайного поиска оптимального решения с использованием эволюционных алгоритмов. Эти алгоритмы представляют собой композицию нескольких

техник: элементов эволюционных стратегий, метода анализа иерархий и элементов теории нечетких множеств.

Разработанная методика реализует решение следующей задачи поиска

$$\max_{X \in \Omega} f(X), \quad (4)$$

где $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, Ω – некоторый гиперпараллелепипед.

Методика включает следующие этапы:

Этап 1. Определение изначального количества потенциальных решений λ и генерация равномерно распределенных в пространстве Ω потенциальных решений $z_1^e, z_2^e, \dots, z_\lambda^e$.

Этап 2. Вычисление значения функции f в точках $z_1^e, z_2^e, \dots, z_\lambda^e$:

$$f_1^e = f(z_1^e), f_2^e = f(z_2^e), \dots, f_\lambda^e = f(z_\lambda^e). \quad (5)$$

Этап 3. Нормирование значения f_j^e путем проверки условия $f_j^{ne} \in [0;1]$,

$$\sum_{i=1}^{\lambda} f_j^{ne} = 1.$$

Этап 4. Формирование матрицы попарных сравнений Саати S : среди нормированных значений функции нахождение минимального значения f_j^{ne} , декомпозиция отрезка $[0;1]$ на 10 интервалов: $[0;0,1), [0,1;0,2), \dots, [0,9;1]$. Тогда для всех значений функции $h \in \{1, 2, \dots, \lambda\}$, если $f_j^{ne} \in [0,1k; 0,1+0,1k)$ и $f_h^{ne} \in [0,1l; 0,1+0,1l)$, где $k, l \in \{0, 1, \dots, 9\}$, то $s_{jh} = l - k + 1$. Другие элементы матрицы S рассчитываются по формуле:

$$s_{pq} = \frac{s_{jq}}{s_{jp}}.$$

Этап 5. Расчет собственных чисел матрицы S , и для максимального собственного числа a_{\max} нахождение вектора w по формуле:

$$w_j = \frac{1}{s_{1j} + s_{2j} + \dots + s_{\lambda j}}. \quad (6)$$

Значение w_j указывает на степень оптимальности (квазиоптимальности) потенциального решения z_j^e .

Этап 6. Генерация «потомков» и формирование новой популяции потенциальных решений. В соответствии с эволюционной стратегией, в данном случае, используется формула:

$$z_j^{e+1} = z_j^e + \xi(N(0,1)), \quad j = \overline{1, \mu}, \quad (7)$$

где $\xi(N(0,1))$ – нормально распределенная случайная величина с нулевым средним и единичной дисперсией; η – количество «потомков» у одного «родителя». При этом на практике целесообразно принять $\mu \geq 7\lambda$.

Этап 7. Расчет степени оптимальности w_j потенциальных решений z_j^e для исследования области Ω , с целью определения как можно большего количества точек зоны распространения ОХВ в атмосфере.

Этап 8. Определение количества потомков в зависимости от оптимальности полученного решения. Количество потомков $N(z_j^e)$ зависит от степени области Ω и заданной точности потенциального решения ε . Для случая, когда Ω является отрезком $N(z_j^e) = g(L([a,b]))$, где $L(*)$ – длина отрезка. Определение величины μ_j производится эвристическим путем, на основе экспертных выводов. На первом этапе рационально считать, что $\mu_j = \mu \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, \lambda\}$.

Этап 9. Определение значения дисперсии для каждого полученного на предыдущих этапах решения. Значение дисперсии σ_j^2 будет зависеть от $L([a,b])$ и ε , а также от расстояния до ближайших соседних решений.

Этап 10. Нахождение $d(z_j^e, z_L)$, $d(z_j^e, z_R)$ – расстояния до ближайшего левого (точка a) и правого (точка b) соседних решений. При этом

$$d_{\max} = \max\{d(z_j^e, z_L), d(z_j^e, z_R)\},$$

тогда по правилу 3-х сигм $\sigma_j = \frac{1}{3} d_{\max}$ 9973 точки из 10000 при генерации будут принадлежать интервалу $(x_j^e - 3\sigma_j, x_j^e + 3\sigma_j)$.

Этап 11. Определение, на основе полученных значений функции f , а также по значениям $f_1^e, f_2^e, \dots, f_\lambda^e$, нахождение λ оптимальных решений $z_1^{e+1}, z_2^{e+1}, \dots, z_\lambda^{e+1}$ и переход к этапу 1.

Результат применения описанной выше методики получается при выполнении некоторой e -й итерации, когда значение $\max_{i,j} |f_i - f_j|$, $i, j = \overline{1, \lambda}$ будет меньше некоторого заранее заданного $\delta > 0$; при этом $\max_{i,j} |z_j^e - z_i^e| < \varepsilon$. Тогда значение z_i^e соответствующее $f_i^e = \max_j f_j^e$ будет решением поставленной задачи.

Вычисленные значения используются в среде геоинформационной системы при генерации цифрового слоя, моделирующего зону распространения ОХВ в атмосфере.

4. 3. Результаты натурного эксперимента оценивания распространения ОХВ в атмосфере, на основе геомодели, вследствие химической аварии в районе г. Белая Церковь, Украина

На сегодня имеется ряд реально функционирующих геоинформационных систем (ГИС), реализованных в рамках концепции эффективного управления территориальным развитием (УТР) [21].

Информационные ресурсы ГИС УТР, в общем случае, включают следующие основные составляющие:

- программно-технический комплекс – ГИС платформа;
- топографическая основа;
- базы атрибутивных данных об объектах управления средствами ГИС;
- предметно-ориентированные тематические картографические модели.

Проблему информационной поддержки решений по вопросам ликвидации последствий и планированию мероприятий по предупреждению чрезвычайных ситуаций, связанных с выбросами ОХВ реализована в оболочке предметно – ориентированной подсистемы ГИС УТР. Указанную систему называют подсистемой управления последствиями выбросов в атмосферу (УНПА). УНПА на практике используется не только для мониторинга выбросов в атмосферу ОХВ в чрезвычайных ситуациях, но и для инвентаризации источников выбросов всех промышленных предприятий на определенной территории.

В состав предметно-ориентированных тематических картографических моделей подсистемы УНПА по каждому потенциально-опасному предприятию включают геомодель загрязнения местности ОХВ при их вероятном выбросе в условиях отсутствия ветра – штиля. Ниже приведен пример геомодели (рис. 6).

В условиях чрезвычайных ситуаций, связанных с выбросами ОХВ в атмосферу, решения по ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций необходимо принимать при существенных ограничениях времени на анализ хода событий. При планировании мероприятий по предупреждению чрезвычайных ситуаций с указанными последствиями критические временные ограничения отсутствуют.

Поэтому, в первом случае, для каждого потенциально-опасного объекта целесообразно иметь заранее рассчитанную геомодель загрязнения местности при наиболее вероятных параметрах метеорологических условий.

Для этого нужно воспользоваться результатами анализа данных о повторяемости (%) направлений ветров по румбам и их среднемесячных скоростей – рис. 6 для местности, где находится соответствующий потенциально-опасный объект.

Как свидетельствует анализ данных по рис. 6, для местности, рассмотренной в предыдущем примере, г. Белая Церковь, можно выделить четыре характерных скорости ветра, а именно: 3.75; 3.5; 3.0; 2.5 м/сек. Каждой из них присущи соответствующие характеристики факела выброса, который рассматривается в прямоугольном трехмерном пространстве XYZ. Центр координат находится в центре источника выброса, ось X совпадает с румбом ветра, ось Z – вертикаль плоскости XOY – рис. 7. Концентрации ОХВ в

произвольной точке зоны факела рассчитывают согласно формулам, приведенным в [20], учитывая особенности рельефа местности.

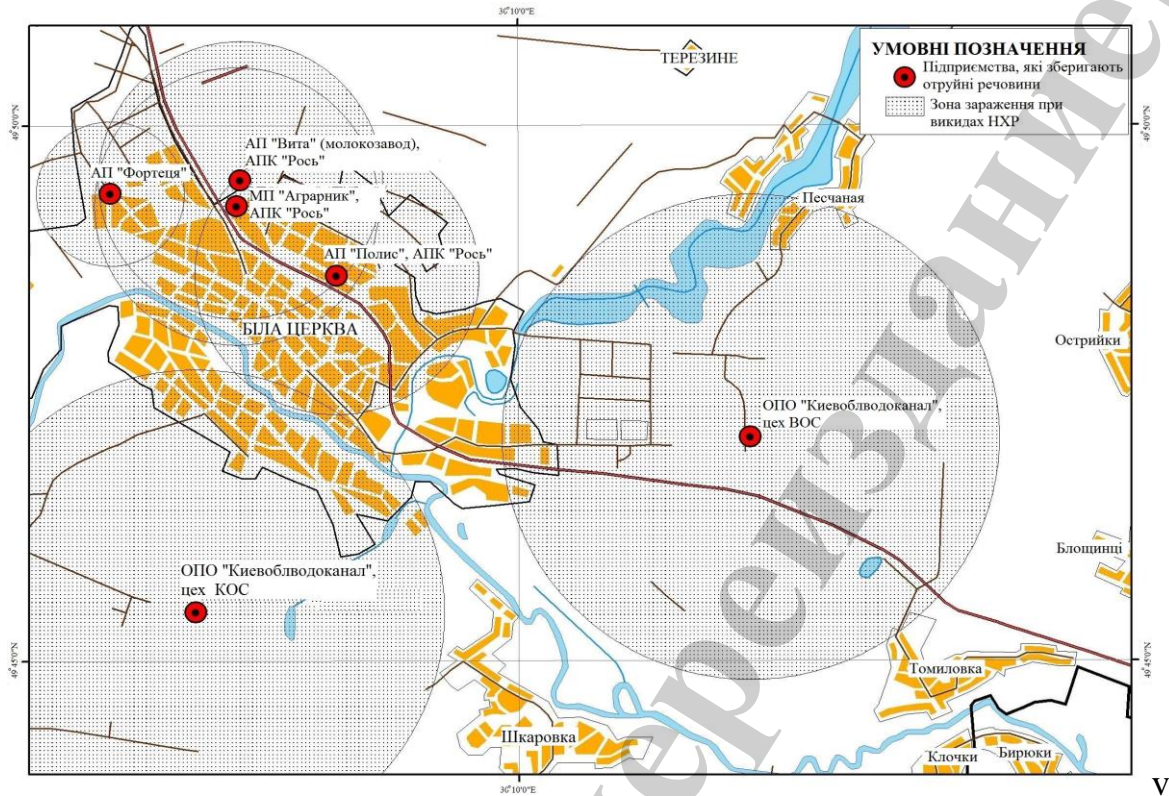


Рис. 6. Геомодель вероятного загрязнения местности ОХВ (окрестности г. Белая Церковь, Украина) при выбросах с ПОО

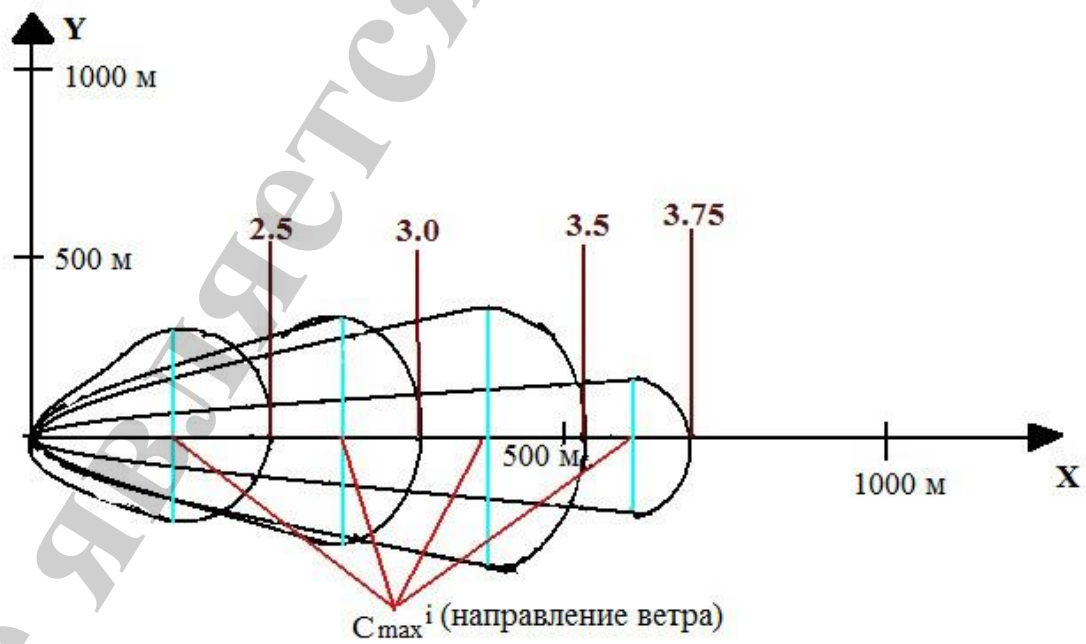


Рис. 7. Проекция факела выброса ОХВ на плоскость, вычисленная на основе методики направленной оптимизации

C_{\max} (мг/м³) концентрация c_{Mx} , на расстоянии x от источника выброса при заданной скорости ветра по оси факела.

Обычно расчет концентраций ОХВ в зоне факела выброса выполняют с нарастающим шагом отметок по оси X . Например, на расстоянии до 500 м через каждые 100 м, а далее – через 500 м или более.

Расчет концентраций ОХВ в направлениях осей Y и Z ведут относительно расстояния от оси факела. При этом C_{\max} (мг/м³) концентрации ОХВ на расстоянии x от источника выброса при заданной скорости ветра по оси факела.

Для определения эффективности разработанной методики с использованием геомодели был выполнен сравнительный анализ с результатами, вычисленными с помощью других методик. При этом за основу были взяты конкретные значения, полученные при серии выбросов фреона-12 из емкости на ПОО в окрестностях г. Белая Церковь, Украина:

- объем выброса 2000 м³ или объемная скорость выброса 4,3 м³/с;
- доля фреона в газовой смеси 31 %;
- скорость ветра 2,1 м/с;
- стабильность атмосферы Е/Ф.
- суммарная продолжительность выброса около 400 с.

В ходе аварии произошло около двух десятков залповых выбросов газообразного фреона-12, как чистого, так и разбавленного воздухом. Облако газа после выброса имело форму цилиндра, объем которого составлял около 2000 куб. м. Основные характеристики каждого из серии выбросов и условия рассеивания ОХВ были следующими: среднее содержание в атмосфере фреона-12–24 %, значение же концентрации фреона-12 в атмосфере по оси ветра приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты эксперимента по определению концентрации фреона-12 в атмосфере при аварии на ПОО в районе г. Белая Церковь

X , м	70	100	150	180	220	350	500
C , % (об)	3,1	1,35	0,8	0,6	0,45	0,28	0,14

Для определения концентрации ОХВ в послеаварийный период исходными данными послужили результаты аналитических расчетов, скорректированные с учетом экспертных заключений. При построении геомодели были использованы данные, полученные в результате 64 экспертных заключений и результатов моделирования с применением различных значений начального объема фреона-12, процента его разбавленности, скорости ветра и стабильности атмосферы, приведенной к численному виду. В эксперименте также предполагалось, что до 500 м от источника аварии условия внешней среды совпадали с условиями на ПОО, а после 500 м – учитывалась застройка и насаждения.

В табл. 2 приведены значения концентрации фреона-12 в трех контрольных точках (Avg) зоны аварии.

Таблица 2

Результаты моделирования концентрации ОХВ в различных точках зоны аварии

Концентрация, %				Время расчетов			
Окрестности г. Белая Церковь		Гауссова модель	Методика Токси-3	Методика направленной оптимизации	Гауссова модель	Методика Токси-3	Методика направленной оптимизации
max	Avg						
12	9,5	42	13	9,71	12	36	134
9	8	14	7,8	8,04			
1	0,6	4,5	0,85	0,59			

Моделирование выполнялось с использованием гауссовой модели в комплексе с алгоритмами направленного эволюционного моделирования. Анализ результатов показал, что точность прогнозирования составила (средняя относительная ошибка) 3,4 %. При моделировании были использованы выводы пяти экспертов о 54 вариантах значений параметров аварии.

На контрольных точках, находящихся на расстоянии в 100, 150, 350 м от центра аварии на ПОО, средняя относительная точность составила 1,7 %, а для точек, находящихся за чертой в 500 м, точность составила 3,6 %.

6. Обсуждение результатов проведенного исследования особенностей процесса определения концентрации ОХВ в атмосфере

Предложенный комплексный подход к моделированию процессов, связанных с распространением ОХВ в атмосфере, имеет важную отличительную особенность. Она состоит в том, что данный подход объединяет геоинформационные технологии, средства экспертного анализа и математическое обеспечение, усовершенствованное путем применения методов направленной оптимизации.

Полезность теоретических результатов заключается в повышении эффективности принимаемых решений по предупреждению ЧС и преодолению их последствий за счет снижения уровня неопределенности при определении текущего состояния процессов распространения ОХВ в атмосфере. Например, в результате гипотетического выброса ОХВ на ПОО «АП «Фортеця»» при повреждении емкости с фреоном (г. Белая Церковь, Украина), уточнение зоны опасной концентрации ОХВ дало бы возможность сэкономить временные и финансовые ресурсы при эвакуации населения из зоны аварии. Данный эффект достигается путем учета большого числа разнородных факторов, определяющих динамику рассматриваемого процесса, и возможности уточнения границ зон опасной концентрации ОХВ.

Преимущество полученных результатов над известными решениями состоит в комплексном использовании адекватного математического аппарата и геоинформационных технологий. В применяемых на практике методических средствах используется либо чисто аналитический подход, либо только

геоинформационные технологии. В первом случае имеет место проблема размерности и неоднородности, а во втором – приближенного представления зоны распространения ОХВ в виде набора простых геометрических фигур.

Реализация геодеи для сценарного примера дала возможность получить прогнозные значения со средним относительным отклонением в пределах 2,2–6,3 %, что является значительно лучшим результатом по сравнению с теми, которые получены с применением других методических средств (Гауссовой модели, методики Токси-3).

Недостаток подхода состоит в том, что для его реализации необходимо наличие развитой структуры станций наземного мониторинга состояния атмосферы в местах расположения многочисленных ПОО, что требует значительных финансовых затрат.

В дальнейшем планируется на основе предложенного подхода разработать универсальную программную среду, допускающую создание соответствующих систем поддержки принятия решений. Однако для применения разработанной технологии в задачах прогнозирования концентрации не только фреона-12, но и других видов ОХВ, а также их смесей, необходимо провести дополнительные исследования в направлении учета физико-химических особенностей этих веществ, а также эффектов, возникающих при их смешении. Последнее обстоятельство обусловлено существованием ряда проблем, не решенных на данном этапе, и не имеющих непосредственного отношения к информационным технологиям.

7. Выводы

1. Усовершенствование математического инструментария расчета концентрации ОХВ в атмосфере дало возможность создать специальную методику, которая, в отличие от существующих, сочетает в себе классические средства (гауссова модель) и методы направленной оптимизации (с использованием элементов эволюционных стратегий, метода анализа иерархий и элементов теории нечетких множеств). Преимуществом этой методики является получение данных о концентрации опасных химических веществ во многих точках зоны их распространения. Соотнесение этих данных со значениями предельно-допустимой концентрации позволяет уточнить границы области распространения ОХВ.

2. Путем объединения аналитических методов с геоинформационными технологиями, была разработана геодеи для реализации технологии информационной поддержки решений по вопросам планирования мероприятий по преодолению последствий чрезвычайных ситуаций, связанных с выбросами в атмосферу опасных химических веществ. Данная модель представляет собой комплекс картографических и аналитических средств моделирования, который характеризуется использованием базы атрибутивных данных об источниках и метеорологических условиях в момент выброса, а также применением программных сервисов геоинформационных систем.

3. Эффективность применения методики расчета концентрации ОХВ в атмосфере, с применением геодеи, была оценена путем сравнительного ана-

лиза результатов расчета на основе классической, гауссовой модели, и стандартной методики Токси-3. Результаты проведенного натурного эксперимента показали, что разработанные методические средства обеспечивают, по сравнению с классическими, большую точность расчетов. В частности, средняя относительная ошибка в определении концентрации ОХВ во всей зоне аварии составила 3,4 %. При этом на контрольных точках, находящихся на расстоянии в 100, 150, 350 м от центра аварии, средняя относительная точность обеспечена на уровне 1,7 %, а для точек, находящихся за чертой в 500 м, – на уровне 3,6 %.

Литература

1. On the Use of Unmanned Aerial Systems for Environmental Monitoring / Manfreda S., McCabe M., Miller P., Lucas R., Pajuelo Madrigal V., Mallinis G. et al. // *Remote Sensing*. 2018. Vol. 10, Issue 4. P. 641. doi: <https://doi.org/10.3390/rs10040641>

2. Технические аспекты создания комплексной автоматизированной информационной системы интеллектуального мониторинга окружающей среды / Файзрахманов Р. А., Слаутин Ю. А., Володин В. Д., Бикметов Р. Р., Шаронов А. А. // *Устойчивое развитие*. 2013. № 10. С. 67–72.

3. Tang R., Bai Y., Wang T. Research on GIS Application System of Environmental Risk for Hazardous Chemicals Enterprises // *Procedia Environmental Sciences*. 2011. Vol. 10. P. 1011–1016. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.09.162>

4. Ключкова Л. В., Орлов Ю. Н., Тишкин В. Ф. Математическое моделирование корреляции эпидемической обстановки в мегаполисах от состояния воздуха // *Журнал Средневолжского математического общества*. 2012. Т. 14, № 2. С. 34–43.

5. Zhu Y. Research on Application of Internet of Things in the Disposal of Environmental Emergency // *MATEC Web of Conferences*. 2015. Vol. 22. P. 04011. doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/20152204011>

6. Research on a 3D Geological Disaster Monitoring Platform Based on REST Service / Leng X., Liu D., Luo J., Mei Z. // *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2018. Vol. 7, Issue 6. P. 226. doi: <https://doi.org/10.3390/ijgi7060226>

7. Development of a Web-based GIS monitoring and environmental assessment system for the Black Sea: application in the Danube Delta area / Tziavos I. N., Alexandridis T. K., Aleksandrov B., Andrianopoulos A., Doukas I. D., Grigoras I. et al. // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2016. Vol. 188, Issue 8. doi: <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5492-z>

8. Рыбка Н. А. Методика оценки масштабов и последствий выбросов (проливов) аварийно химически опасных веществ // *Вестник ВГУ. Сер.: Химия, биология, фармация*. 2014. № 2. С. 37–40.

9. Методы и модели анализа данных: OLAP и Data Mining / Барсегян А. А., Куприянов М. С., Степаненко В. В., Холод И. И. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2004. 336 с.

10. Рошупкин Э. В. Нейросетевая модель прогноза загрязнения атмосферного воздуха // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2010. № 4. С. 266–271.

11. Мосягин А. А. Мониторинг потенциально опасных объектов на основе логико-вероятностного моделирования: дисс. ... канд. техн. наук. Москва, 2009. 212 с.

12. Білошицький М. В. Визначення вибухонебезпеки виробничих приміщень за надходження до них горючих газів або парів горючих рідин // Науковий збірник Інституту державного управління у сфері цивільного захисту. 2013. № 1. С. 97–103.

13. Басманов А. Е., Говаленков С. С. Математическая модель диффузии опасных химических веществ в воздухе // Проблемы надзвичайних ситуацій. 2008. № 8. С. 29–39.

14. Терехов В. И., Тетерин И. М., Топольский Н. Г. Проблемы применения вычислительного интеллекта при планировании задач по предотвращению и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций // Материалы XV межд. научн.-практ. конф. «Системы безопасности». Москва: Академия МЧС России, 2006. С. 49–52.

15. Techniques for Assessing Industrial Hazards: manual. Washington, DC: The World Bank, 1988. No. 55.

16. The HGSYSTEM version 3.0 technical reference manual. Shell Internationale Research Maatschappij BV. Hague, 1994. 321 p.

17. ГОСТ Р12.3.047-98 ССБТ. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля.

18. РД 52.04.253-90. Методика прогнозирования масштабов заражения сильнодействующими ядовитыми веществами при авариях (разрушениях) на химически опасных объектах и транспорте. Москва: Гидрометеоздат, 1991. 64 с.

19. Арнольд В. И. Теория катастроф. Москва: Ленанд, 2016. 134 с.

20. Машихина П. Б. Моделирование распространения примеси в атмосфере с учетом рельефа местности // Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. 2009. № 27. С. 138–142.

21. Карманов А. Г., Кнышев А. И., Елисеева В. В. Геоинформационные системы территориального управления: учеб. пос. Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2015. 121 с.