

С. А. Фокин¹✉, Я. А. Лесных¹, А. В. Дубровский¹

К вопросу создания пространственных математических моделей техногенных чрезвычайных ситуаций

¹Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: alekseifokin401@gmail.com

Аннотация. В статье рассматриваются ключевые проблемы и возможные направления создания и развития пространственных моделей техногенных чрезвычайных ситуаций. Рассмотрены и проанализированы существующие модели по предсказанию и последующей ликвидации чрезвычайных ситуаций. Определены их общие недостатки и способ их объединения в виде предложенной концепции многоуровневой комплексной пространственно-математической модели техногенных чрезвычайных ситуаций, включающей модули исходных данных, сценарное моделирование, физико-математическое ядро и визуализацию. Особое внимание было уделено пространственной неоднородности, объединению различных моделей и «человеческому фактору». Показано, что создание и развитие данных моделей является ключевым элементом для перехода от ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций к инициативному управлению безопасностью.

Ключевые слова: пространственная модель, математическое моделирование, геоинформационные системы, искусственный интеллект, прогнозирование, управление рисками, физико-химические процессы

S. A. Fokin¹✉, Y. A. Lesnykh¹, A. V. Dubrovsky¹

On the issue of creating spatial mathematical models of man-made emergency situations

¹Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: alekseifokin401@gmail.com

Abstract. This article examines key challenges and potential development directions in the development of spatial models for man-made emergencies (TMEs). Existing models for predicting and subsequently responding to emergencies are reviewed and analyzed. Their common shortcomings are identified, along with a proposed approach to combining them into a multi-level, integrated spatial-mathematical TME model, including input data modules, scenario modeling, a physical-mathematical core, and visualization. Particular attention is paid to spatial heterogeneity, the integration of various models, and the human factor. It is demonstrated that the creation and development of this model is a key element in the transition from post-emergency response to proactive safety management.

Keywords: spatial model, mathematical modeling, geoinformation systems, artificial intelligence, forecasting, risk management, physico-chemical processes

Введение

Современный этап промышленного развития характеризуется сложностью и ростом концентрации опасных производственных объектов, что многократно

увеличивает риски возникновения техногенных катастроф с масштабными последствиями. Традиционные подходы к ликвидации чрезвычайных ситуаций (ЧС), базирующиеся на стандартных планах и ретроспективном анализе, зачастую неэффективны в условиях уникальной и быстро меняющейся обстановки. В этой связи создание математических моделей, способных не только описать, но и спрогнозировать развитие техногенных чрезвычайных ситуаций (ТЧС) в пространстве и времени, становится ключевой научно-технической задачей.

Особую актуальность приобретают именно пространственные модели, интегрирующие такие параметры, как рельеф местности, географическое положение потенциально опасных объектов, расположение инфраструктуры и распределение населения, погодные и климатические особенности и другие географически локализованные данные. Подобные комплексы служат основой для интеллектуальных систем поддержки принятия решений (СППР), используемых МЧС и другими службами быстрого реагирования.

Методы и материалы

Существуют следующие, модели по прогнозированию (предсказанию) и последующей ликвидации ТЧС:

- детерминистические – используют физические модели для прогнозирования последствий и описывают физико-химические процессы: модели распространения пожара, затопления территории при паводках, рассеивания химических облаков [1];

- статистические – оценивают вероятность возникновения событий на основе статистики ретроспективных данных о данной ТЧС;

- основанные на работе искусственного интеллекта (ИИ) – алгоритмы ИИ анализируют базы данных из разнообразных источников (СМИ, социальные сети, спутниковые снимки и т.д.) для выявления закономерностей и возможного предсказания ТЧС, например, прогноз лесных пожаров [2], паводков, землетрясений;

- ГИС-ориентированные – создают карты устойчивости территорий основываясь на картографировании рисков и последствий, но только с интеграцией с динамическими физическими моделями они способны к прогнозированию [3].

Результаты

Основной недостаток существующих моделей прогнозирования (предсказания) и последующей ликвидации ТЧС – их разрозненность друг от друга. Не все чрезвычайные ситуации можно предугадать и предотвратить этими методами. Например, полет цистерны из-за взрыва на ГАЗС в Октябрьском районе Новосибирска, рис. 1 а) [4]. Цистерна с пропаном в результате взрыва пролетела почти 400 метров и по счастливой случайности не задела другую автозаправочную станцию, рис. 1 б), что привело бы к еще одному взрыву, так как в цистерне еще было горючее топливо, которое загорелось при приземлении возле остановки общественного транспорта «Лазурная». Еще через несколько десятков метров, от падения цистерны находится 11-ти этажный жилой дом, поэтому последствия

могли бы быть более катастрофичными. При попадании цистерны в дом пострадали бы десятки квартир, а остатки горючего топлива могли бы вызвать возгорания и неминуемые жертвы среди жильцов и простых прохожих.

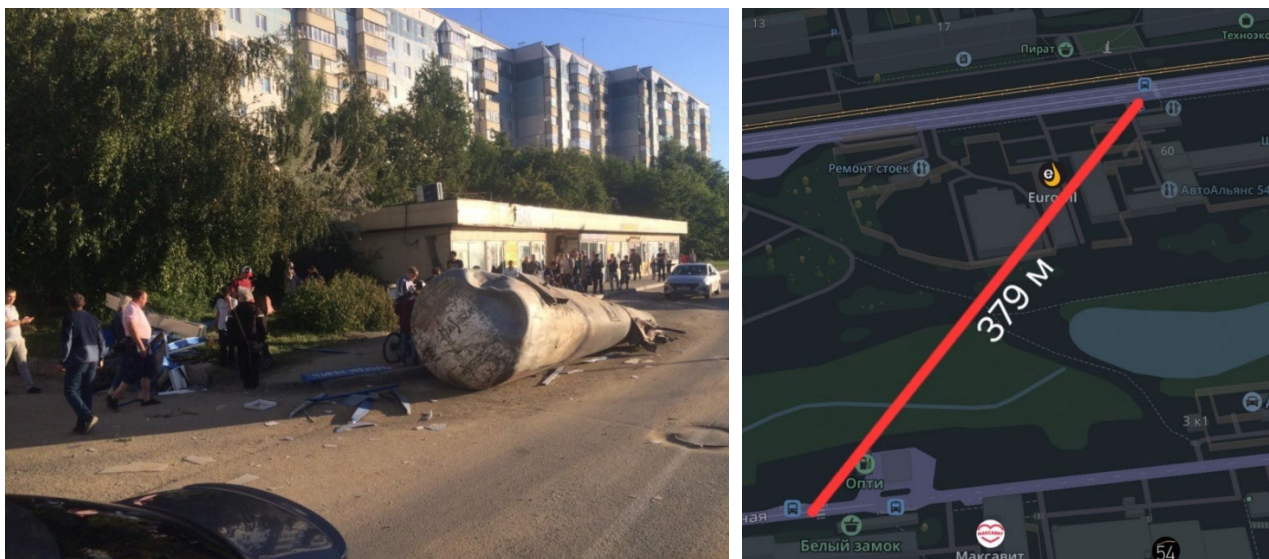


Рис. 1. а) Фотография падения цистерны с пропаном [4];
б) траектория полета цистерны в результате взрыва

Для моделирования и предотвращения даже таких, казалось бы, непредвиденных, сложно прогнозируемых ТЧС, необходимо синтезировать и объединить в едином модельном комплексе существующие методы.

В ответ на выявленные ограничения предлагается архитектура многоуровневой комплексной пространственно-математической модели ТЧС, интегрирующей разнородные данные и математические алгоритмы для построения динамической картины ЧС. Ее структура включает следующие взаимосвязанные модули, описание которых представлено далее.

Модуль пространственных данных и ГИС – формирует фундамент для расчетов, аккумулируя статические и динамические данные: цифровые модели рельефа и местности [5], сведения о критической инфраструктуре (КИИ), метеоданные в реальном времени, а также физико-химические свойства аварийно химически опасных веществ (АХОВ), присутствующих на потенциально-опасных объектах.

Модуль сценарного моделирования и инициализации – запускает процесс моделирования, определяя конкретный сценарий аварии (взрыв, пожар, разрыв трубопровода и т.д.) и ее стартовые параметры [6]. Модуль функционирует в двух режимах: детерминированном (по заданному сценарию) и стохастическом, где с помощью, например, методов Монте-Карло, генерируется множество исходных событий для оценки полей риска [7].

Физико-математическое ядро – является вычислительным центром системы, представляя собой комплекс связанных моделей, например, таких как:

– модель распространения веществ – основана на уравнениях Навье-Стокса для газов и жидкостей [8].

– модель тепломассопереноса и горения – описывает динамику пламени, тепловое излучение и воздействие огня.

– модель волновых процессов – рассчитывает параметры ударных волн при взрывах.

– модель воздействия – вычисляет опасные факторы (тепловой поток, избыточное давление) и определяет зоны поражения.

– модуль анализа и визуализации – преобразует результаты расчетов в удобный для лиц, принимающих решения, формат: строит динамические карты, моделирует пути эвакуации [9], рассчитывает риски [6] и обеспечивает 3D-визуализацию развития ЧС.

В упрощенном виде формула пространственной математической модели техногенных чрезвычайных ситуаций $M_{ТЧС}$, может быть представлена в следующем виде:

$$M_{ТЧС} = \{\Omega, t, \mathcal{L}[S(r, t), H(r, t), U(r, t), D(r, t)]V(r), \psi(S, V)\},$$

где:

Ω – Интегральный ущерб в определенной области пространства;

$t \in [0, T]$ – время;

$r = (x, y, h)$ – точка в области пространства чрезвычайной ситуации [10];

$\mathcal{L}$ – оператор эволюции поражающего фактора;

$S(r, t)$ – распространение поражающего фактора (концентрация токсиканта, температура, давление, уровень радиации и т.д.);

$H(r, t)$ – интенсивность источника опасности (например, мощность выброса, концентрация вредного вещества, тепловая мощность пожара и т.д.);

$U(r, t)$ – вектор внешних условий (скорость ветра, гидродинамические поля, рельеф, свойства грунта);

$D(r, t)$ – коэффициент диффузии/турбулентного перемешивания;

$V(r)$ – уязвимость территории (плотность населения, наличие критической инфраструктуры, природные барьеры);

$\psi(S, V)$ – функция последствий (например, вероятность поражения человека, повреждения зданий).

Такую модель можно адаптировать под конкретный тип техногенной ЧС (химическая авария, радиационная, пожар, взрыв), уточняя вид $\mathcal{L}, H, \psi$.

Обсуждение

Ключевые вызовы и перспективы развития многоуровневой комплексной пространственно-математической модели ТЧС сопряжены с рядом научных и технических проблем:

– пространственная неоднородность – наличие застройки, рельефа и растительности кардинально меняет картину распространения ударной волны или облака АХОВ, что требует привлечения суперкомпьютерных мощностей;

– интеграция разнородных моделей – сопряжение моделей, оперирующих разными единицами измерения, временными масштабами и программными средами, представляет значительную сложность.

– учет человеческого фактора – непредсказуемость поведения людей в условиях стресса, вызванная инстинктивным поведением и паникой, требует моделирования каждого человека как отдельного агента, что кратно увеличивает вычислительную нагрузку на систему;

Перспективным направлением для преодоления этих барьеров является активное внедрение технологий искусственного интеллекта. Машинное обучение позволяет:

– существенно снизить вычислительную нагрузку за счет создания метамоделей;

– автоматизировать мониторинг данных с датчиков и камер для раннего обнаружения угроз;

– оптимизировать в реальном времени планы эвакуации и распределение ресурсов.

Заключение

Создание адекватных пространственных моделей ТЧС – это междисциплинарная задача, находящаяся на стыке математики, информатики, физики и геодезии. Предложенная концепция комплексной модели, объединяющей ГИС-технологии, детерминированное и стохастическое моделирование, а также методы ИИ, открывает путь к созданию принципиально новых систем проактивного управления рисками. Внедрение таких решений в практику служб быстрого реагирования и промышленных предприятий позволит совершить переход от ликвидации последствий к их упреждающему предупреждению, что минимизирует как человеческие жертвы, так и экономический ущерб.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. — М.: Наука, 1982. — 320 с.
2. Jain, P., et al. (2020). A review of machine learning applications in wildfire science and management. *Environmental Reviews*, 28(4), 478–505.
3. Злобин В.К., Мнацаканян А.Г. Применение геоинформационных систем для оценки рисков чрезвычайных ситуаций // *Информационные технологии*. — 2019. — Т. 25. — № 5. — С. 305–312.
4. Цистерну отбросило после взрыва на газовой АЗС в Новосибирске. *Вести Новосибирск*. 14.06.2021 Г. [Электронный ресурс] — Режим доступа: https://www.nsktv.ru/news/proisshestviya/tsisternu_otbrosilo_posle_vzryva_na_gazovoy_azs_v_novosibirske/.
5. Тикунов В.С. Моделирование в геоинформационных системах. — М.: Научный мир, 2012. — 784 с.
6. Белов П.Г. и др. Методы анализа риска в техносфере. — М.: Юрайт, 2018. — 392 с.
7. Соболев И.М. Методы Монте-Карло. — М.: Наука, 1985. — 312 с.
8. Безуглая И.В., Смирнова И.В. Математическое моделирование распространения примесей в атмосфере. — СПб.: СПбГУ, 2010. — 180 с.

9. Кошмаров Ю.А. Прогнозирование последствий чрезвычайных ситуаций на объектах экономики. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2010. – 210 с.
10. Дубровский, А.В. Анализ природных и техногенных особенностей геопространства чрезвычайной ситуации / А.В. Дубровский, А.П. Карпик, Э.Л. Ким / Итерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр., 10-20 апреля 2012 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия»: сб. материалов в 3 т. Т.3. – Новосибирск: СГГА, 2012 – С. 171-177.

© С. А. Фокин, Я. А. Лесных, А. В. Дубровский, 2026