

## Миграция паров от закопанных в землю боеприпасов\*

О.Б. Кудряшова<sup>1</sup>, В.М. Грузнов<sup>2</sup>, А.В. Кихтенко<sup>2</sup>,  
М.Н. Балдин<sup>2</sup>, А.Б. Ворожцов<sup>1</sup>, Ю.М. Михайлов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

<sup>2</sup> *Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск, Россия*

Проблема гуманитарного разминирования актуальна из-за неразорвавшихся боеприпасов, которые невозможно обнаружить стандартными методами. Один из способов – поиск следовых количеств веществ в воздухе и почве с помощью химических датчиков. Предложена математическая модель диффузии паров взрывчатых веществ через почву. Исследовано влияние влажности на скорость диффузии и введено характерное время обнаружения паров над почвой. Проведены оценки концентрации паров RDX, PETN и TNT в зависимости от глубины и продолжительности залегания вещества. Обнаружено, что рост концентрации паров нелинейный.

**Ключевые слова:** *неразорвавшиеся боеприпасы, миграция паров, взрывчатые вещества, диффузионная модель, обнаружение паров.*

### Введение

Гуманитарное разминирование – это комплекс мероприятий, направленных на поиск, обнаружение и обезвреживание взрывоопасных предметов, таких как мины и неразорвавшиеся боеприпасы. Эти действия необходимы для защиты гражданского населения, восстановления безопасного использования земель для сельского хозяйства, строительства и других целей, а также для снижения экономических и социальных последствий после окончания боевых действий или в мирное время. Более ста миллионов таких опасных предметов осталось после военных конфликтов в 68 странах мира [1, 2]. В то время как ежегодно обезвреживается более ста тысяч мин, устанавливается около двух миллионов новых [3].

Поиск и обнаружение закопанных мин и неразорвавшихся боеприпасов – сложная техническая задача. Традиционно используются технологии поиска металлических предметов, но они имеют ограничения: ложные тревоги, неспособность обнаружить неметаллические боеприпасы, ограниченная глубина обнаружения, помехи от металла и электромагнитных излучений. Таким образом, необходимы сенсоры, регистрирующие пары взрывчатых веществ (ВВ), так как все мины и боеприпасы содержат взрывчатые компоненты. Перспективным направлением является разработка технологий дистанционного детектирования паров ВВ, мигрирующих из закопанных объектов к поверхности почвы. Однако низкая равновесная концентрация паров многих ВВ и сложность процессов их транспорта в природных средах создают значительные трудности.

Ключевой проблемой математического моделирования является адекватное описание миграции паров в пористой среде, в особенности влияние влажности почвы. Предыдущие модели часто содержали упрощения и некорректно описывали фундаментальное различие в скорости переноса вещества в сухих и водонасыщенных грунтах, что приводило к значительным погрешностям в прогнозах.

Цель данной работы – развитие более полной и точной диффузионной модели миграции паров взрывчатых веществ, нацеленной на устранение указанных недочетов. Новая модель призвана более корректно учесть влияние вариаций влажности почвы на параметры переноса. Для проверки адекватности модель верифицирована путем сравнения результатов расчетов с экспериментальными данными. Ожидается, что предлагаемый подход позволит лучше прогнозировать диапазон возможных поверхностных концентраций паров ВВ для различных условий и типов источников, что необходимо для оценки принципиальной возможности их обнаружения.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2024-557 от 25.04.2024).