

УДК 551.51:504.3.054
DOI 10.17513/use.38400

ОЦЕНКА И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ РИСКОВ ПРИ УТЕЧКЕ СОЛЯНОЙ КИСЛОТЫ

Шишкин А.В., Кочетова Ж.Ю., Вартазарова А.Э.

*Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия
имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж,
e-mail: an_vartazarova@mail.ru*

Цель работы – расчет экологических рисков в г. Воронеж при возможной аварии на химически опасном предприятии 1 класса опасности при утечке соляной кислоты. Экологический риск оценивали по соотношению количества людей в зараженных зонах к общей численности населения города. Для установления зон токсической опасности использовали программу Areal Locations of Hazardous Atmospheres; численности населения в этих зонах – базу данных Maps.ie, в которой обработка информации по неравномерности населения осуществляется при помощи искусственного интеллекта, позволяющего быстро и с высокой точностью оценить количество людей, проживающих в выделенных зонах опасности. Программа Areal Locations of Hazardous Atmospheres позволяет прогнозировать закономерности рассеивания облаков и уровни токсической опасности широкого перечня химически опасных соединений при различных сценариях утечек и залповых выбросах токсикантов. При этом учитываются физические свойства соединений и условия их хранения; объемы выбросов; метеорологические параметры; типы подстилающей поверхности; технические особенности аварии. Модель Areal Locations of Hazardous Atmospheres построена на основе классического дисперсионного уравнения непрерывных потоков загрязнения воздуха. Результаты моделирования визуализируются в виде диаграмм распространения токсикантов в течение 1 часа от начала аварии. Полученные геометрические формы облаков токсикантов совмещаются с картами местностей, подверженных потенциальной угрозе заражения. В результате исследования установлены наиболее неблагоприятные условия потенциальной аварии: летний период, инверсия атмосферы, направление ветра – юго-западное.

Ключевые слова: соляная кислота, авария, утечка, программное обеспечение Areal Locations of Hazardous Atmospheres, прогноз токсической опасности, оценка рисков, уязвимость населения, Воронеж

ASSESSMENT AND VISUALIZATION OF INDIVIDUAL ENVIRONMENTAL RISKS IN CASE OF HYDROCHLORIC ACID LEAKAGE

Shishkin A.V., Kochetova Zh.Yu., Vartazarova A.E.

*Military Educational and Scientific Center of the Air Force «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin
Air Force Academy», Voronezh, e-mail: an_vartazarova@mail.ru*

The aim of the work is to calculate environmental risks in the city of Voronezh in the event of a possible accident at a chemically hazardous enterprise of hazard class 1 due to a hydrochloric acid leak. Environmental risk was assessed based on the ratio of the number of people in contaminated areas to the total population of the city. To establish toxic hazard zones, the Area Locations of Hazardous Atmospheres program was used; to determine the population in these zones, the Maps.ie database was used, in which the processing of information on population unevenness is carried out using artificial intelligence, which allows for a quick and highly accurate assessment of the number of people living in the identified hazard zones. The Area Locations of Hazardous Atmospheres program allows predicting cloud dispersion patterns and toxic hazard levels for a wide range of chemically hazardous compounds under various leak scenarios and salvo emissions of toxicants. The physical properties of the compounds and their storage conditions; emission volumes; meteorological parameters; underlying surface types; technical features of the accident are taken into account. The Area Locations of Hazardous Atmospheres model is based on the classical dispersion equation of continuous air pollution flows. The modeling results are visualized as diagrams of toxicant distribution within 1 hour from the onset of the accident. The resulting geometric shapes of toxicant clouds are combined with maps of the area exposed to the potential threat of contamination. As a result of the study, the most unfavorable conditions for a potential accident were established: summer, atmospheric inversion, wind direction – southwest.

Keywords: hydrochloric acid, accident, leakage, Areal Locations of Hazardous Atmosphere, toxic hazard forecast, risk assessment, vulnerability of the population, Voronezh

Введение

Прогнозирование загрязнения окружающей среды в результате аварийных выбросов токсичных веществ с применением методов физико-математического моделирования – эффективный инструмент

для снижения экологических рисков при проектировании, эксплуатации предприятий в штатном режиме, а также на стадиях принятия решения о предотвращении развития чрезвычайных ситуаций и ликвидации их последствий [1; 2]. Экологические

риски, вызванные техногенными авариями на химически опасных предприятиях, в последние годы значительно возросли, что связано с увеличением террористических актов на территории страны. Поэтому актуальна разработка надежных алгоритмов прогнозирования развития чрезвычайных ситуаций, позволяющих в режиме времени, близком к реальному, оценивать риски и управлять ими.

Для моделирования сценариев утечки и распространения токсиканта выбрано программное обеспечение Areal Locations of Hazardous Atmospheres (ALOHA) – «Ареал расположения опасных сред», которое применяется специалистами разных стран, хорошо себя зарекомендовало благодаря возможности исследования распространения большого перечня летучих веществ с различными физико-химическими свойствами в разнообразных географических и метеорологических условиях [3; 4]. В статье рассматриваются сценарии утечек соляной кислоты, широко используемой в технологических процессах химической, металлургической, лакокрасочной, пищевой, фармацевтической, медицинской промышленности.

Водный раствор соляной кислоты (HCl) представляет собой бесцветную прозрачную жидкость со специфическим острым запахом. Техническая кислота имеет желто-зеленый оттенок, что связано с примесями хлора и солей железа [5]. Максимально возможная концентрация вещества в растворе составляет 36% масс. (плотность раствора 1,18 г/см³). Техническую концентрируемую HCl выпускают с массовой долей 27,5 или 31%. Торговую соляную кислоту называют концентрированной, если ее концентрация $\geq 24\%$. Такая кислота «дымит» на воздухе, так как газообразные молекулы HCl образуют с влагой воздуха мельчайшие капли. Соляная кислота не горюча и не взрывоопасна, поэтому в работе прогнозируются только токсические риски при распространении облака [5].

Предельно допустимые концентрации соляной кислоты в воздухе рабочей зоны и населенных пунктов соответственно равны 0,5 и 0,2 мг/м³ (2 класс опасности) [5]. При вдыхании в течение часа воздуха, содержащего 200 мг/м³ паров соляной кислоты, возможен летальный исход.

Экологические риски, связанные с утечкой соляной кислоты, возникают при превышении нормативов ее содержания в воздухе. При этом на зараженных территориях в зоне высокой токсической опасности

возможно отравление всего живого. Кислотные осадки, образующиеся в результате взаимодействия паров кислоты с влагой воздуха, могут выпадать на значительном удалении от места аварии. Они изменяют свойства почв и вод. Так, при понижении pH воды до 5 ед. погибает рыба, нарушаются трофические цепи, уменьшается число видов водных животных, водорослей и бактерий. Кислотные осадки ускоряют разрушение исторических памятников, зданий, сооружений, техники [5]. При масштабных утечках в холодный период кислота мало испаряется, и основная ее часть может просачиваться через почву, загрязняя подземные воды [6].

Цель работы – расчет экологических рисков в г. Воронеж при возможной аварии на химически опасном предприятии 1 класса опасности при утечке соляной кислоты.

Материал и методы исследования

Для прогноза распространения паров соляной кислоты в воздухе использовали общедоступную программу ALOHA, разработанную Агентством по охране окружающей среды (США). Программа базируется на гауссовой дисперсионной модели непрерывных потоков загрязнения воздуха, способной прогнозировать рассеивание более 900 химических веществ в атмосфере, подвижность которых сопоставима с подвижностью воздуха [7]. Модель описывается общим уравнением:

$$C = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \left[e^{-\frac{(z-y)^2}{2\sigma_z^2}} + e^{-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}} \right],$$

где C – концентрация газа в атмосфере (мг/м³); Q – скорость выброса вещества из источника, мг/с; h – эффективная высота (относительно земли) выброса, м; y – расстояние при боковом ветре от центральной линии шлейфа, м; z – расстояние по вертикальной оси относительно земли, м; u – средняя скорость ветра, м/с; σ_y , σ_z – коэффициенты горизонтального и вертикального рассеивания, представляющие стандартные отклонения распределения концентрации загрязняющих веществ в направлении оси бокового ветра и в направлении вертикальной оси, м [8].

Кривые σ_y и σ_z отражают условия стабильности атмосферы. Классы стабильности атмосферы изменяются от очень нестабильных условий A до очень стабильных F , как показано в таблице 1 [9].

Таблица 1

Классы устойчивости атмосферы

Скорость ветра, м/с	Класс				
	Дневное время. Солнечное излучение			Ночное время. Облачность	
	Сильное	Среднее	Слабое	> 50%	< 50%
<2	A	A-B	B	E	F
2–3	A-B	B	C	E	F
3–5	B	B-C	C	D	E
>5	C	C-D	D	D	D

Источник: составлено авторами на основе [8].

При распространении химических соединений в воздухе класс вертикальной устойчивости атмосферы играет важнейшую роль как в формировании облака, так и в его перемещении и осаждении. В приземном слое температура воздуха по мере увеличения высоты повышается. Чаще всего это инверсионный процесс, вызванный тем, что летом в безветренные ночи потоки воздуха от нагретой за день земной поверхности поднимаются вверх, а охлажденный на высоте 20–40 м воздух опускается вниз. Задерживающий слой мешает развитию вертикального перемещения воздуха, поэтому под ним часто скапливаются пыль и водяные пары, формируются слои тумана или дыма. Инверсия не дает распространиться облаку токсиканта по высоте, и образуются наиболее «подходящие» условия для сохранения и перемещения его высоких концентраций [10].

Для изотермии более свойственны стабильность температуры воздуха в некотором атмосферном слое и соответственно стабильные равновесные состояния воздуха. Изотермия типична для пасмурной погоды и, как правило, возникает в утренние и вечерние часы. Она, так же как и инверсия, способствует длительному застою аэрозолей и паров токсичных соединений в промышленных зонах и населенных пунктах [10].

При неустойчивой атмосфере наблюдается конвекция – процесс вертикального перемещения теплого воздуха вверх, а холодного (более плотного) – вниз. Обычно это явление наблюдается летом в дневные часы при безветренной и ясной погоде. Поднимающиеся вверх потоки воздуха рассеивают облако токсичного вещества, разбавляют его и препятствуют горизонтальному распространению [10].

На начальном этапе в программу ALO-NA вводятся следующие параметры: название исследуемого вещества (физико-хими-

ческие параметры есть в базе данных программы, пользователям можно добавлять новые вещества); местоположение источника выброса (широта, долгота и высота над уровнем моря); климатические и географические условия (температура воздуха, относительная влажность, скорость ветра, класс стабильности атмосферы, тип подстилающей поверхности); технические характеристики емкости для хранения вещества (тип, размеры, давление) и условия утечки (высота, размеры источника выброса; интенсивность и объемы выброса; температура хранения вещества).

Результатом моделирования является графическое изображение шлейфа распространяющегося облака токсичного вещества в первый час после его утечки. Цветом изображаются уровни токсической опасности в рассчитанных зонах: 1) очень высокий уровень – красный цвет (концентрация паров HCl в воздухе более 153,15 мг/м³); 2) средний уровень – оранжевый цвет (концентрация более 33,7 мг/м³); 3) низкий уровень – желтый цвет (концентрация более 2,8 мг/м³). Очень высокому уровню опасности подвержены территории, где загрязнение окружающей среды может иметь серьезные последствия для здоровья населения (до мгновенного летального исхода). Районы, отмеченные оранжевым цветом, потенциально представляют высокую опасность для жизни и здоровья людей, относящихся к чувствительным категориям (дети, пожилые люди, пациенты с хроническими заболеваниями легких, беременные женщины и т.д.). Здоровье населения, находящегося в желтой зоне, вероятно, не будет подвержено серьезным угрозам.

Для оценки численности уязвимого населения и экологических рисков полученные графические изображение моделей шлейфа HCl возможно совместить с картой

местности, кадастровой картой или базой данной плотности населения. В этой работе использовали базу данных Maps.ie, позволяющую точно и быстро оценивать количество населения на выделенных участках любой геометрической формы.

Индивидуальный экологический риск оценивали по наиболее важному лимитирующему показателю – угроза жизни и здоровью человека [11; 12, с. 176]. Его можно рассчитать как соотношение уязвимого населения к общей численности населения в г. Воронеж. То есть риск отождествляется с вероятностью того, что человек в своей жизнедеятельности может испытать то или иное неблагоприятное экологическое воздействие. Индивидуальный экологический риск характеризует экологическую опасность в определенной точке пространства, где находится индивидум, то есть характеризует распределение риска в пространстве.

Объект исследования – потенциально возможные сценарии утечки HCl на химически опасном предприятии первого класса опасности АО «Воронежсинтезкаучук», расположенного в густонаселенном Левобережном районе г. Воронеж.

Результаты исследования и их обсуждение

Рассматривали несколько значительно различающихся по начальным условиям сценариев возможных аварий на предприятии АО «Воронежсинтезкаучук», связанных с утечкой соляной кислоты из цистерны. Метеорологические условия распространения паров кислоты приведены в таблице 2.

По предполагаемым сценариям произошла утечка из вертикального резервуара, в котором находится ~ 6 т концентрированной соляной кислоты при температуре окружающего воздуха (высота утечки от поверх-

ности земли 1 м; диаметр отверстия 50 см). В соответствии с возможностями, предоставляемыми программным обеспечением, в качестве источника загрязнения атмосферы была выбрана образовавшаяся на бетонном покрытии лужа кислоты с диаметром 20 м. Количество выброшенной кислоты за время аварии составило 2,5 т. Наиболее подходящий тип подстилающей поверхности, учитываемый в программе, «город + лес». Этот тип учитывает плотную застройку в исследуемом районе и наличие зеленых насаждений.

Время испарения загрязняющего вещества ограничено моделью и составляет 60 мин. Через это время возможно изменение метео- и технических условий, поэтому необходима корректировка вводимых параметров. Результаты моделирования распространения облака соляной кислоты представлены на рисунке 1. Пунктиром обозначены вероятные зоны заражения при возможном изменении направлении ветра в зависимости от класса устойчивости атмосферы.

Анализ результатов моделирования показывает, что в зимний период при низких температурах и испаряемости соляной кислоты красные зоны потенциального риска для жизни человека не выходят за границы предприятия. При этом температура воздуха и устойчивость атмосферы имеют большее влияние на формирование облака тяжелого газа, испаряющегося с поверхности лужи, чем скорость ветра. В условиях летнего периода, при которых испаряемость кислоты из лужи повышается на порядок, глубина заражения территории увеличивается, может при инверсии атмосферы достигать 2,7 км. Распространению концентрированного облака в значительной мере способствует инверсия атмосферы.

Таблица 2

Метеорологические условия для моделирования выброса соляной кислоты

Атмосферные параметры	Зима (ср.)*	Зима (экстр.)*	Лето (ср.)*	Лето (экстр.)*
Обозначение сценария	З _{ср}	З _{экстр}	Л _{ср}	Л _{экстр}
Время	21:00	21:00	21:00	21:00
Скорость ветра, м/с	2,9	9	2,3	9
Температура, °С	-6,3	-20,9	+20,4	+35,0
Влажность, % относит.	87	35	62	15
Класс устойчивости атмосферы	C	D	B	C

Примечание: *средние и экстремальные значения за январь и июнь 2013–2023 гг.
Источник: https://tr5.ru/Архив_погоды_в_Воронеже.

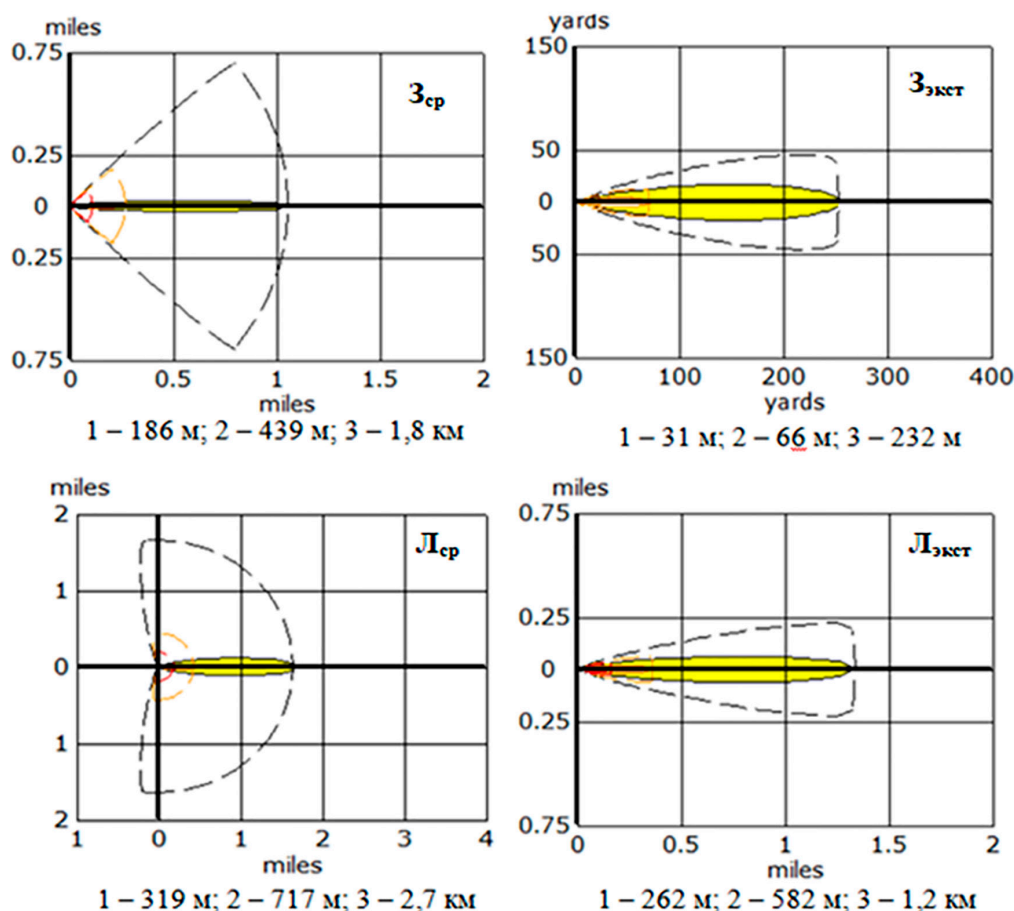


Рис. 1. Зоны опасности (1–3) при распространении облака соляной кислоты в течение 1 часа от начала аварии
Источник: составлено авторами на основе [4]

Летние погодные условия (жаркая сухая погода) способствуют тому, что соляная кислота при истечении из цистерны мгновенно закипает за счет теплоты растворения HCl и поднимается в воздух в виде тяжелого аэрозоля. При этом увеличивается давление паров соляной кислоты, и начинается интенсивное испарение воды. Последнее вызывает снижение температуры кипящей кислоты и возращение ее концентрации. Концентрированное облако HCl в зависимости от метеорологических условий и объема выброса оседает на различном расстоянии от источника, а затем начинается вторичное испарение кислоты, которое может длиться от нескольких минут до нескольких суток.

Для оценки экологического риска исследуемую территорию делили на 4 сектора в соответствии с направлением ветра (откуда дует): северо-восточное (С-В); юго-восточное (Ю-В); юго-западное (Ю-З) и северо-западное (С-З). Далее по базе данных Maps.ie определяли количество населения

в каждом секторе в зонах риска 1–3 для наихудшего сценария развития утечки соляной кислоты (Л_{cp}). Результаты оценки численности уязвимого населения представлены в таблице 3.

Всего в зоне потенциального риска с радиусом 2,7 км проживает 86,6 тыс. человек, из них в зоне среднего уровня опасности, которым может понадобиться эвакуация или медицинская помощь, – 12,8 тыс. человек. В северо-восточном секторе по направлению ветра находится промышленная, дорожно-транспортная зоны, сквер, а также участок Воронежского водохранилища (рис. 2). Количество работников база данных Maps.ie не считает, поэтому в данном случае численность потенциально пострадавших человек в таблице 2 занижена. Надо отметить, что HCl хорошо растворяется в воде, поэтому находящееся на пути распространения облака Воронежское водохранилище будет способствовать снижению концентрации кислоты в воздухе.

Таблица 3

Количество населения в зонах риска при потенциальной утечке соляной кислоты при реализации сценария L_{cp}

Уровень риска	Концентрация HCl в воздухе, мг/м ³	Количество населения, подвергающегося риску в секторе направления ветра, тыс. чел.				Критическое воздействие HCl
		С-В	Ю-В	Ю-З	С-З	
I	$\geq 153,15$	работники предприятия ~ 0,045 (1 смена в цехе)				Возможен летальный исход
II	$\geq 33,7$	0,2	1,8	8,7	2,1	В большинстве случаев обратимое раздражение, риску подвержены уязвимые группы населения
III	$\geq 2,8$	16,6	4,4	34,1	18,7	Обратимое воздействие на организм, иногда требуется медицинская помощь

Источник: составлено авторами с использованием [13, с. 387].

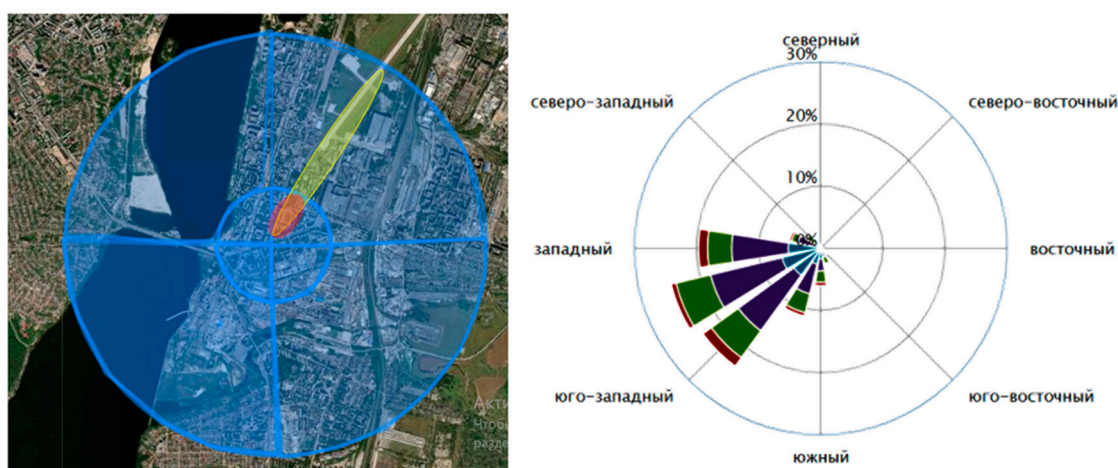


Рис. 2. Оценка уровней риска при утечке соляной кислоты
Источник: составлено авторами на основе [4]

Наибольшее количество пострадавших может ожидаться при юго-западном направлении ветра. Здесь расположены микрорайоны города с многоэтажной застройкой, учебные учреждения, детские сады, больницы, крупные промышленные предприятия и испытательный аэродром. Именно это направление ветра по статистике является наиболее вероятным в летний период в г. Воронеж. На рисунке 2 показано применение программного обеспечения АЛОНА и базы данных численности населения при моделировании сценария L_{cp} и юго-западном направлении ветра.

Первая степень присваивается химической техногенной катастрофе, если в зону возможного заражения попадает свыше 75 тыс. человек; вторая – 40–75 тыс.; третья – менее 40 тыс. Четвертая степень при-

сваивается катастрофе, когда зона возможного химического заражения находится в пределах санитарно-защитной зоны объекта (ГОСТ Р 22.0.05-2020). В соответствии с этой градацией и с учетом розы ветров при утечке соляной кислоты на химически опасном предприятии в черте г. Воронеж может развиваться катастрофа второй степени опасности при юго-западном направлении ветра; третьей степени – во всех остальных случаях.

По данным Федеральной службы государственной статистики, на 10 февраля 2025 г. в Воронеже проживает 1 041 668 человек. Расчет индивидуальных экологических рисков (отношение числа уязвимого населения к общему) показал, что экологический риск в I зоне токсической опасности в первый час после аварии составляет

$4 \cdot 10^{-5}$; во II и III зонах соответственно риски равны $1 \cdot 10^{-2}$ и $7 \cdot 10^{-2}$. Индивидуальный экологический риск считается приемлемым для химически опасного предприятия, если он составляет $\sim 10^{-5}$. Во второй и третьей зонах токсической опасности экологический риск находится на высоком уровне, что требует принятия дополнительных защитных мер как на самом предприятии, так и на территории города.

Заключение

Проведена оценка экологических рисков в г. Воронеж при утечке 2,5 т соляной кислоты из вертикального резервуара на территории химически опасного объекта в г. Воронеж. При исследовании разных метеорологических условий утечки кислоты установлено, что наиболее опасна авария в летний период, вечерние часы. Основное влияние на глубину распространения и концентрацию облака при прочих сопоставимых условиях оказывает устойчивость атмосферы. Скорость ветра и влажность воздуха влияют в меньшей степени. Оценка экологических рисков показала, что при аварийном выбросе HCl в первой зоне токсической опасности могут находиться только работники цеха (риск $4 \cdot 10^{-5}$). Такой риск считается приемлемым для химически опасных объектов I класса опасности. Общий радиус заражения территории при реализации наихудшего метеорологического сценария может составлять 2,7 км. В этом случае экологические риски во второй и третьей зонах находятся на высоком уровне, они составляют $1 \cdot 10^{-2}$ и $7 \cdot 10^{-2}$.

Интеграция общедоступных программ расчета зон токсической опасности ALOHA и базы данных численности населения показали возможность широкого использования этих инструментов для прогнозирования развития чрезвычайных ситуаций в режиме времени, близком к реальному, а также на стадиях проектирования химически опасных объектов и управления экологическими рисками. Приведенный в работе алгоритм оценки уязвимости населения и оценки экологических рисков может стать готовым электронным пособием для специалистов в области охраны окружающей среды, безопасности жизнедеятельности.

Список литературы

1. Айдовос А.А., Айдовос Г.А., Данаев Н.Т., Ажиева Г.И., Нарбаева С.М. Математические модели прогнозирования состояния окружающей среды при аварийных техногенных загрязнениях ограниченной части региона // Успехи современного естествознания. 2014. № 5-1. С. 179–181. URL:

<https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=33873> (дата обращения: 18.05.2025).

2. Ударцева О.В., Гальцев С.А. Методика анализа и оценки рисков аварийных ситуаций на химически опасных объектах // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2018. № 1 (36). С. 36–42. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-analiza-i-otsenki-riskov-avariynyh-situatsiy-na-himicheskii-opasnyh-obektah> (дата обращения: 18.05.2025).

3. Chehraz D., Davami A.H., Kazemi R., Yengejeh R.J. Comparison of numerical calculations and ALOHA modeling in consequence assessment of chlorine gas emissions from ethylene dichloride reactors // Environ Monit Assess. 2024. May 17. Is. 196 (6). P. 553. DOI: 10.1007/s10661-024-12694-z.

4. Кочетова Ж.Ю., Шишкин А.В., Внукова С.В., Трошин А.Л. Программное обеспечение для моделирования распространения облака аммиака при разгерметизации трубопровода // Физические основы наукоемких технологий: материалы Всероссийской научно-методической конференции (г. Воронеж, 17 апреля 2024 г.). Воронеж: издательство Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова, 2024. С. 56–62. DOI: 10.58168/PBST_56-62.

5. Прохоров С.А., Потапова С.О. Токсическая опасность соляной кислоты // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. 2018. Т. 1. № 9. С. 758–761. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/toksicheskaya-opasnost-solyanoy-kisloty.pdf> (дата обращения: 18.05.2025).

6. Кочетова Ж.Ю., Терентьев В.В. Особенности трансформации некоторых отравляющих веществ в почве // Перспективные научные исследования: теория, методология и практика применения: сборник статей международной научной конференции (Санкт-Петербург, 07 февраля 2023 г.). СПб.: ООО «Международный институт перспективных исследований имени Ломоносова», 2023. С. 14–15. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50352981> (дата обращения: 18.05.2025).

7. Лисанов М.В., Пчельников А.В., Сумской С.И. Моделирование рассеяния выбросов опасных веществ в атмосфере // Российский химический журнал. 2005. № 49 (4). С. 18–28. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-rasseyaniya-vybrosov-opasnyh-veschestv-v-atmosfere> (дата обращения: 18.05.2025).

8. Humayun M.T. Ubiquitous Low-Cost Functionalized Multi-Walled Carbon Nanotube Sensors for Distributed Methane Leak Detection // IEEE Sensors Journal. 2016. Vol. 16. Is. 24. P. 8692-8699. DOI: 10.1109/JSEN.2016.2581832.

9. Блашинская О.Н., Патрушев К.Ю. Моделирование рассеивания выброса загрязняющих веществ с учетом влияния адсорбции на изменение концентрации в атмосфере населенных мест // Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. 2023. № 1. С. 252–257. URL: <https://angtu.editorum.ru/ru/nauka/article/66023/view> (дата обращения: 18.05.2025).

10. Хисматуллина А.Ф., Гасилов В.С., Чижова М.А., Хайруллина Л.И. Влияние метеорологических условий на распространение токсичных веществ в окружающем пространстве // Вестник Казанского технологического университета. 2017. Т. 20. № 12. С. 152-157. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-meteorologicheskikh-usloviy-na-masshtabny-i-posledstviya-avariy-na-himicheskii-opasnyh-obektah> (дата обращения: 18.05.2025).

11. Медведева С.А. Экологический риск. Общие понятия, методы оценки. XXI век // Техносферная безопасность. 2016. Т. 1. № 1. С. 67–81. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekologicheskii-risk-obschie-ponyatiya-metody-otsenki> (дата обращения: 18.05.2025).

12. Кочетова Ж.Ю., Базарский О.В., Пантелеев Д.А. Экология почв военных полигонов. Воронеж: Научная книга, 2023. 184 с. ISBN: 978-5-4446-1791-5.

13. Могош Г. Острые отравления. Диагноз, лечение. Бухарест: Медицинское изд-во, 1984. 579 с.