

Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева

На правах рукописи

Папаев Павел Леонидович

**ЯЧЕЕЧНО-НЕЙРОСЕТЕВАЯ СИСТЕМА КОМПЬЮТЕРНОГО АНАЛИЗА
ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИЙНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ
ХИМИЧЕСКИМИ ПРОИЗВОДСТВАМИ**

05.13.01 Системный анализ, управление и обработка информации (химическая технология)

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук,
доцент С. П. Дударов

Москва 2018

Содержание

| | |
|--|-----|
| Введение..... | 5 |
| Глава 1. Современное состояние научных исследований по разработке и использованию информационных систем моделирования и оценки последствий загрязнения атмосферы промышленными аварийными источниками..... | 13 |
| 1.1. Системный анализ состояния загрязнения атмосферы промышленными источниками выбросов | 13 |
| 1.2. Классификация задач анализа последствий аварийного загрязнения атмосферы промышленными источниками | 19 |
| 1.3. Систематизация экспериментальных данных для оценки последствий аварийных выбросов и примеров реальных промышленных аварий..... | 27 |
| 1.4. Анализ отечественного и мирового опыта использования ячеечно-нейросетевого подхода и искусственных нейронных сетей при оценке последствий загрязнения воздуха | 43 |
| 1.5. Исследование современного опыта разработок информационных систем для анализа последствий аварийного загрязнения атмосферы промышленными источниками | 52 |
| 1.6. Выводы..... | 60 |
| Глава 2. Разработка ячеечно-нейросетевых моделей и специальных алгоритмов системного анализа последствий аварийного загрязнения атмосферы промышленными источниками..... | 61 |
| 2.1. Методология системного подхода к анализу последствий аварийного загрязнения атмосферы промышленными источниками..... | 61 |
| 2.2. Обоснование выбора ячеечно-нейросетевого подхода как математического аппарата анализа последствий аварийного загрязнения атмосферы..... | 69 |
| 2.3. Постановки задач ячеечно-нейросетевого моделирования последствий аварийного загрязнения атмосферы промышленными источниками | 85 |
| 2.4. Методика системного анализа и обработки исходной выборки при ячеечно-нейросетевом моделировании последствий аварийного загрязнения атмосферы..... | 102 |

| | |
|---|-----|
| 2.5. Выводы..... | 112 |
| Глава 3. Разработка ячеечно-нейросетевой системы компьютерного анализа последствий аварийного загрязнения атмосферы промышленными источниками..... | 113 |
| 3.1. Организационная и функциональная структуры информационной системы «ЯНСКА»..... | 113 |
| 3.2. Информационно-логическая и даталогическая модели данных информационной системы «ЯНСКА» | 119 |
| 3.3. Разработка компьютерных методов визуализации информации и проектирование интерфейса пользователя информационной системы | 122 |
| 3.4 Алгоритмическое обеспечение интеллектуальной поддержки принятия решений по результатам работы информационной системы «ЯНСКА» | 127 |
| 3.5. Программная реализация основных сценариев визуализации, трансформации и компьютерного анализа информации | 131 |
| 3.6. Выводы..... | 149 |
| Глава 4. Использование информационной системы «ЯНСКА» для компьютерного анализа последствий аварийного загрязнения атмосферы промышленными источниками..... | 151 |
| 4.1. Оценка последствий аварийного выброса для гипотетического промышленного источника с использованием информационной системы «ЯНСКА» | 151 |
| 4.2. Верификация методического и программно-алгоритмического обеспечения системы на примерах произошедших промышленных аварий | 168 |
| 4.3. Принятие решений по оценке последствий аварийного выброса на промышленном объекте с использованием информационной системы «ЯНСКА» | 177 |
| 4.4. Выводы..... | 183 |
| Заключение и основные замечания | 184 |
| Перечень принятых сокращений | 185 |
| Перечень основных обозначений | 186 |
| Список используемой литературы | 188 |

| | |
|---|-----|
| Приложение 1. Универсальная выборка..... | 199 |
| Приложение 2. Акт об использовании компьютерной системы ячеечно-нейросетевого моделирования для анализа последствий аварий с выбросом опасных химических веществ..... | 212 |
| Приложение 3. Письмо ООО «УралПромБезопасность» | 213 |
| Приложение 4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ | 214 |
| Приложение 5. Основные фрагменты исходного кода информационной системы «ЯНСКА» | 215 |

Введение

Актуальность темы

Объемы производства и хранения аварийно-опасных химических веществ ежегодно возрастают, что повышает актуальность решения задач обеспечения промышленной и экологической безопасности химических производств и окружающих их территорий. Это, в свою очередь, требует разработки и использования эффективного информационного и программно-алгоритмического обеспечения компьютеризированных систем управления промышленной и экологической безопасностью, базирующихся на методологии системного анализа (СА) и современных математических методах.

Научное сообщество постоянно разрабатывает новые современные методы решения задачи оценки воздействия на окружающую среду (ОВОС) и социальную сферу аварийных загрязнений атмосферы промышленными выбросами. Традиционно для решения этих задач используются сложные математические модели и алгоритмы ОВОС, учитывающие динамику распространения загрязнений. Разработка указанных математических моделей предельно затруднена из-за высокой значимости влияния дополнительных внешних аэрогидродинамических факторов, поэтому часто в них принимают различные допущения, например, о постоянстве метеорологических и других характеристик, что в большинстве случаев приводит к неадекватному отображению реальных наблюдаемых процессов в атмосфере.

СА современных научных исследований по ОВОС показал, что для учета различных аэрогидродинамических факторов, влияющих на распространение загрязнений в атмосфере, при долгосрочном прогнозировании недостаточно широко используются методология системного подхода и методы теории искусственного интеллекта (ИИ), в частности, искусственные нейронные сети (ИНС).

В связи с этим решаемая в диссертации научная задача разработки и практического применения ячеечно-нейросетевой системы компьютерного анализа (ЯНСКА) последствий аварийного загрязнения атмосферы промышленными источниками с использованием методологии СА и инструментальных методов теории ИНС, имеет актуальное научное и практическое значение.

Степень научной разработанности темы исследования

Анализ научно-технических разработок по экологической и промышленной безопасности производственных предприятий позволил выявить большое количество научных трудов по ОВОС химических веществ, выполненных в разное время

ведущими отечественными учеными: академиком РАН В. П. Мешалкиным и профессором О. Б. Бутусовым [1, 2] – по компьютерному моделированию и оценке последствий негативного воздействия промышленных предприятий на экологические системы; академиком Ю. А. Израэлем [3] – по экологическому мониторингу и анализу влияния техногенных факторов на окружающую среду (ОС); академиком Г. И. Марчуком [4] – по компьютерному моделированию рассеяния загрязнений в атмосфере; профессорами А. Ф. Егоровым и Т. В. Савицкой [5] – по анализу риска и оценке последствий промышленного загрязнения атмосферы для управления промышленной и экологической безопасностью; профессором В. М. Панариным [6, 7] – по автоматизированным системам мониторинга, анализа экологической информации и прогнозирования загрязнения атмосферы промышленных регионов; профессором М. Е. Берляндом [8] – по изучению диффузионных моделей рассеяния загрязнений в атмосфере с учетом внешних влияющих факторов; профессорами В. Г. Горским и Т. Н. Швецово-Шиловской [9, 10] – по методическому и программному обеспечению (ПО) анализа аварийной опасности химических производств.

Большой научный вклад в разработки математических моделей рассеяния загрязнений в атмосфере (в том числе на основе ИНС), развитие систем экологического контроля и автоматизированных компьютерных систем управления промышленной и экологической безопасностью внесли зарубежные учёные: S. V. Barai [11], A. B. Chelani [12], U. A. Sahin [13], F. Pasquill [14], S. R. Hanna [15], V. Marshall [16], W. Strauss [17], S. J. Mainwaring [17] и другие.

Актуальные научные исследования, выполненные в диссертационных работах последних лет, посвящены проблемам совершенствования методики для моделирования процессов рассеяния загрязнений (к. ф.-м. н. К. М. Антропов [18], к. ф.-м. н. А. А. Барт [19], к. ф.-м. н. Д. С. Хачунц [20], к. т. н. Е. С. Мухаметшина [21]), разработки информационного и программно-алгоритмического обеспечения автоматизированных систем мониторинга и управления качеством атмосферы (д. т. н. А. А. Горюноква [22], к. т. н. А. В. Ильинская [23], к. т. н. Е. А. Михайлова [24]), разработки компьютерных систем управления безопасностью и принятия решений на опасных промышленных объектах (д. т. н. Е. Р. Мошев [25], д. т. н. И. В. Степанченко [26], к. т. н. Луэ Ху Дык [27]).

В последние годы разработаны и широко применяются информационные системы (ИС) ОВОС и управлению безопасностью: ТОКСИ+Риск (ОАО НТЦ «Промышленная безопасность»), «Облако» (НПП «Логус»), СДЯВ ППА (фирма «Интеграл»), Phast (компания Det Norske Veritas), Risk-Based Inspection (институт нефти

American Petroleum Institute) и FRED (компания Shell). Эти ИС осуществляют оперативное и долгосрочное прогнозирование возможных производственных химических аварий при постоянных метеоусловиях. Указанные ИС используются при анализе последствий аварийных загрязнений с учетом изменения рельефа местности и наличия сооружений, влияющих на распространение загрязнений.

Однако в указанных научных исследованиях и разработанных ИС практически не используются методы обработки и интеллектуального анализа больших массивов внешних данных в режиме реального времени, процедуры оперативной ОВОС и принятия решений по управлению безопасностью промышленных производств.

Таким образом, разработка ячеечно-нейросетевых моделей (ЯНМ), алгоритмов и ИС «ЯНСКА», применение которой позволяет оценивать последствия аварийного загрязнения атмосферы при заданном сценарии изменения метеоусловий с учетом оперативно поступающих данных, в том числе в условиях их неполноты и фрагментарности, несомненно являются актуальными научными задачами.

Цель диссертационной работы

Разработать методическое, алгоритмическое и программно-информационное обеспечение ИС «ЯНСКА» с использованием методологии системного подхода; применить разработанную ИС «ЯНСКА» для ОВОС и принятия научно-обоснованных управленческих решений в чрезвычайных ситуациях (ЧС).

Для реализации указанной цели в диссертации поставлены и решены следующие взаимосвязанные научные задачи:

- выполнить СА химических производств как источников опасности аварийных химических выбросов в атмосферу с учетом развития опасности для промышленных объектов, производственного персонала и населения;
- разработать ЯНМ оценки последствий аварийного загрязнения атмосферы при стационарных и изменяющихся метеоусловиях;
- разработать алгоритм принятия решений по оценке последствий аварийного загрязнения атмосферы;
- разработать функциональную структуру, инфологическую и даталогическую модели данных ИС «ЯНСКА»;
- разработать компьютерные методы визуализации, трансформации и анализа больших массивов информации о результатах оценки последствий аварийного загрязнения атмосферы;

- разработать программно-алгоритмическое и информационное обеспечение ИС «ЯНСКА»;
- применить разработанную ИС «ЯНСКА» для оценки последствий ранее произошедших промышленных аварий.

Объекты исследования

Техногенно-природные и социально-экономические системы, включая химические производства, как источники аварийной химической опасности.

Предмет исследования

Информационное, математическое и программно-алгоритмическое обеспечение ИС «ЯНСКА» для анализа и оценки процессов и последствий распространения загрязнений в атмосфере в результате аварий на химических производствах.

Информационная база исследования

Данные о результатах экспериментальных исследований процессов загрязнения атмосферы в результате залповых выбросов химических веществ, о фактически произошедших промышленных авариях, о физических и токсических свойствах химических веществ.

Материалы периодических научных изданий, трудов конференций и информация в сети Интернет.

Методы исследования

Методы СА; методы разработки баз данных (БД) и ПО компьютерных систем; методы обработки больших массивов данных (масштабирование и нормализация, оценка репрезентативности); методы корреляционного анализа; методы теории ИНС; методы проверки адекватности и верификации математических моделей.

Положения, выносимые на защиту

1. ЯНМ оценки и визуализации пространственных и временных профилей и полей концентрации химических загрязнений в атмосфере.
2. Алгоритм принятия решений по оценке последствий аварийного загрязнения атмосферы.
3. Организационно-функциональная структура ИС «ЯНСКА».
4. Информационно-логическая и даталогическая модели данных в системе «ЯНСКА».

5. Компьютерные алгоритмы интерактивной визуализации, трансформации и анализа информации по оценке последствий аварийного загрязнения атмосферы.
6. Информационное и программно-алгоритмическое обеспечение компьютерной системы «ЯНСКА».
7. Результаты практического применения ИС «ЯНСКА» для оценки последствий аварий на техногенных объектах.

Научная новизна

1. Разработан метод ячеечно-нейросетевого компьютерного анализа последствий аварийного загрязнения атмосферы выбросами химических производств, отличающийся применением процедуры пространственно-временного дискретного описания процесса распространения загрязнений в атмосфере на основе многослойных перцептронов, что позволяет определять пространственные и временные профили концентрации загрязнений в атмосфере, зоны загрязнения (ЗЗ) и токсического поражения при аварийном загрязнении промышленными источниками.
2. Разработаны ЯНМ рассеяния загрязнений в атмосфере, отличающиеся учетом сценариев изменения метеоусловий и возможностью дополнения недостающих исходных данных на основе методов интерполяции, что позволяет математически более точно описывать распространение загрязнений, и более точно оценивать их последствия.
3. Разработаны логико-вычислительный метод и алгоритм принятия решений по анализу альтернативных маршрутов эвакуации производственного персонала и населения из аварийных зон, отличающиеся использованием результатов ячеечно-нейросетевого компьютерного анализа последствий аварийного загрязнения атмосферы промышленными источниками, что позволяет повысить оперативность и эффективность предлагаемых организационно-управленческих и инженерно-технических мероприятий по минимизации последствий и ликвидации аварий.
4. Разработаны алгоритмы интерактивной визуализации исходных данных и результатов расчетов оценки воздействия химических загрязнений на людей, отличающиеся гибкостью взаимосвязей между графическими и табличными формами представления информации, синхронностью трансформации результатов при любых изменениях в исходных данных

или параметрах настройки ЯНМ, что позволяет упростить и ускорить процедуры анализа причин и принятия решений по минимизации и ликвидации последствий аварийного загрязнения атмосферы.

5. Предложена методика построения программно-информационной архитектуры ИС «ЯНСКА», отличающаяся интеграцией всех вычислительных процедур, результатов вычислительных экспериментов, процедур обработки внешних данных в режиме реального времени и наличием основных ЯНМ рассеяния загрязнений в атмосфере, что позволяет принимать научно обоснованные решения по анализу последствий аварийных выбросов химических производств в атмосферу.

Научная значимость

Совокупность предложенных в диссертации ЯНМ рассеяния загрязнений в атмосфере, разработанных логико-вычислительных и нейросетевых алгоритмов анализа причин и принятия решений по минимизации и ликвидации последствий аварийного загрязнения атмосферы представляет собой развитие теоретических основ СА последствий аварийных загрязнений атмосферы химическими производствами, что имеет важное научно-техническое значение для разработки инструментальных комплексов программ ОВОС и анализа сценариев и оценки последствий аварийного загрязнения атмосферы.

Практическая значимость

- разработанная с использованием интегрированной среды и языка программирования Delphi с использованием системы управления базами данных (СУБД) MySQL ИС «ЯНСКА» может практически применяться: в научно-исследовательских организациях, изучающих проблемы промышленной и экологической безопасности и методы их решения; в проектных организациях при разработке проектной документации по обеспечению промышленной и экологической безопасности химических производств; экологическими службами химических предприятий и уполномоченными организациями по экспертизе в области промышленной и экологической безопасности для оценки и анализа последствий реальных и потенциально возможных аварийных выбросов в атмосферу;
- разработанная ИС «ЯНСКА» может использоваться промышленными предприятиями, уполномоченными службами и организациями по экспертизе в области промышленной и экологической безопасности для

оценки последствий аварийного загрязнения атмосферы не только при различных метеоусловиях, в условиях неполноты и фрагментарности исходных данных для принятия оперативных решений по эвакуации работников предприятий и населения по наиболее безопасным маршрутам при возникновении промышленных аварий;

- разработанные алгоритмы принятия решений по эвакуации производственного персонала и населения на основе оценки последствий аварийного загрязнения атмосферы обеспечивают повышение оперативности и эффективности принимаемых управленческих решений на различных уровнях управления;
- разработанные методы и алгоритмы интерактивной визуализации исходных данных и результатов расчетов позволяют ускорить анализ результатов ОВОС и повысить эффективность принимаемых решений с использованием ИС «ЯНСКА» должностными лицами предприятий и надзорных организаций, принимающими решения, связанные с анализом и обработкой информации в области промышленной и экологической безопасности.

Практическая реализация результатов работы

Научные и прикладные результаты работы практически использованы для разработки рекомендаций по обеспечению экологической безопасности при загрязнении атмосферы промышленными источниками в Управлении обеспечения безопасности населения, гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций (г. Новомосковск, Тульская область) и в ООО «УралПромБезопасность» (г. Пермь).

Разработанная ИС «ЯНСКА» зарегистрирована в Федеральной службе по интеллектуальной собственности (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012616901, 02 августа 2012 года).

Апробация работы

Результаты диссертации докладывались на ряде Международных и Всероссийских конференций: Международный конгресс молодых ученых по химии и химической технологии (Москва, 2012, 2013 и 2015 годы), Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях» (Нижний Новгород, 2013 год), Международная научно-практическая конференция молодых ученых по проблемам техносферной безопасности в рамках первой всероссийской Недели охраны труда (Москва, 2015 год), Международный российско-швейцарский

семинар «От фундаментальных исследований к коммерциализации научных идей» (Москва, 2016 год).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ, из них 3 статьи в рецензируемых журналах; 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Личный вклад автора в совместных публикациях составляет не менее 80 %.

Глава 1. Современное состояние научных исследований по разработке и использованию информационных систем моделирования и оценки последствий загрязнения атмосферы промышленными аварийными источниками

1.1. Системный анализ состояния загрязнения атмосферы промышленными источниками выбросов

Основным источником информации об экологической ситуации, проблемах и способах их решения в нашей стране и в отдельных регионах является ежегодный государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации». Один из последних таких докладов (за 2014 год) [28] был опубликован в декабре 2015 года.

В соответствии с данными [28], наблюдения за загрязнением атмосферного воздуха в России проводятся в 252 городах на 697 станциях, причем в 229 городах на 636 станциях наблюдения Росгидромета в 2014 году были регулярны. Количество городов с наибольшим уровнем загрязнения насчитывается 51 (24 % городов), в которых проживает 19 % городского населения России. Степень загрязнения воздуха в них оценивается как высокая и очень высокая.

Для сравнения, в 2013 году высокий и очень высокий уровень загрязнения был отмечен в 123 городах (57 % городов), в которых проживало на тот момент 54,2 млн. человек, что составляло 52 % городского населения России [29]. Но стоит отметить, что такое резкое изменение показателей загрязнения воздуха связано не с улучшением качества воздуха, а с новым значением среднесуточной предельно допустимой концентрации (ПДК) формальдегида, которое в 2014 году увеличили более чем в 3 раза. По старому значению ПДК в этот список бы попало 107 городов [28].

В Приоритетный список городов с наибольшим уровнем загрязнения атмосферного воздуха в 2014 году включено 19 городов, причем на территории или вблизи некоторых из них находятся предприятия нефтехимической и химической промышленности. По сравнению с 2013 годом из списка были исключены такие крупные города как Москва, Иваново, Екатеринбург и другие. Резкое уменьшение количества городов в Приоритетном списке (рис. 1.1), опять же, связано с увеличением значения среднесуточной ПДК формальдегида [28, 30].

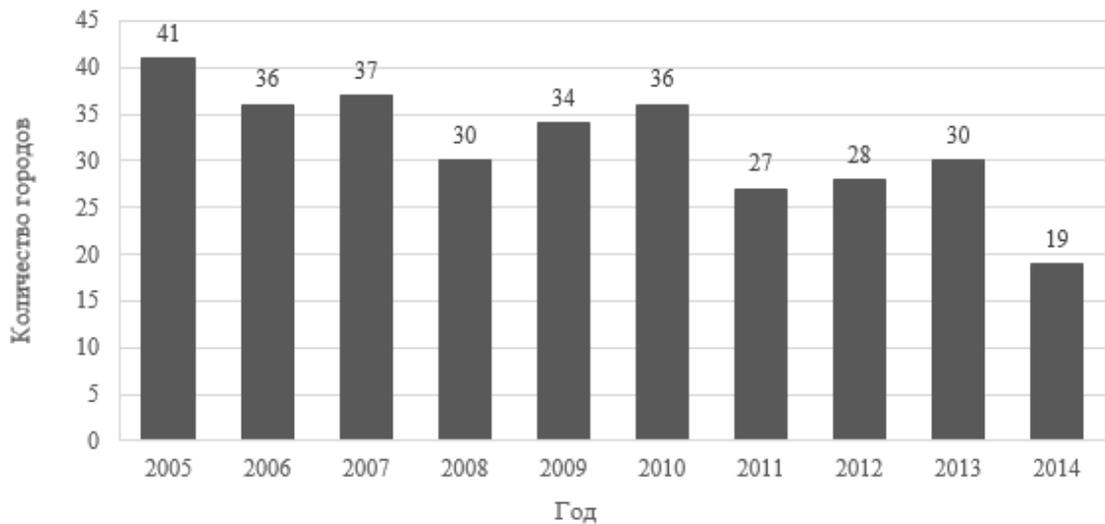


Рис. 1.1. Количество городов, которые были включены в Приоритетный список городов с наибольшим уровнем загрязнения в России

Согласно [31, 32] в 2014 году в 174 городах средняя за год концентрация по одному или нескольким загрязняющим веществам (ЗВ) превышает 1 ПДК. Превышения норм ПДК в 10 и более раз зафиксировано в 44 городах, что на 6 больше, чем в 2013 году (рис. 1.2).

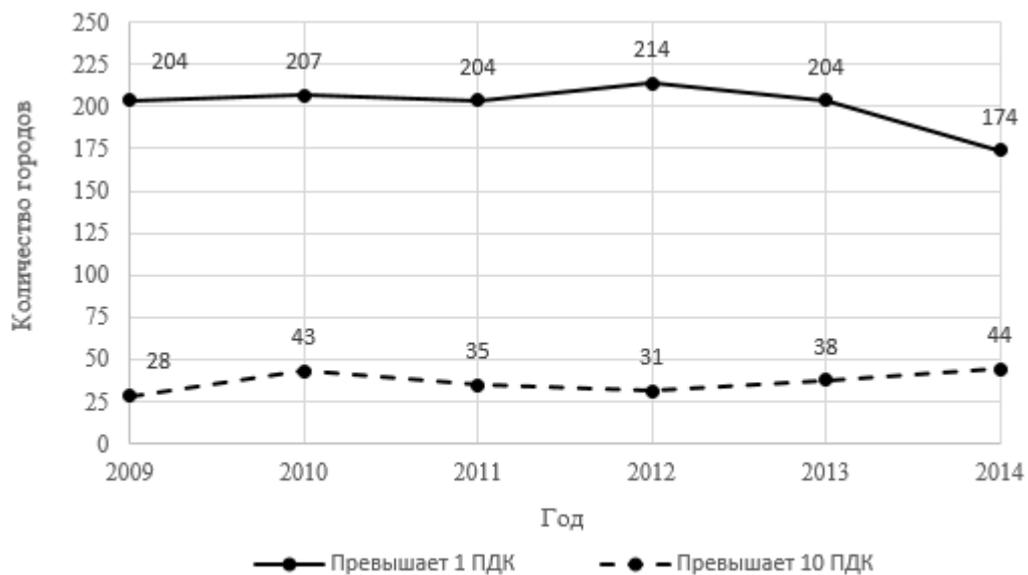


Рис. 1.2. Количество городов, в которых среднегодовые концентрации одного или нескольких веществ превышали предельно допустимые концентрации

Основными источниками попадания ЗВ в атмосферу являются: обрабатывающие производства (5932,4 тыс. т), добыча полезных ископаемых (4943,8 тыс. т), производство и распределение электроэнергии, газа и воды (3761,5 тыс. т) и прочие

[28] (рис. 1.3). Как отмечено в [30], хотя за период 2010 – 2014 гг. уровень загрязнения от промышленных производств во многих городах снизился на 17 – 46 %, все же, наибольший вклад вносят предприятия металлургического комплекса, нефтепереработки, химические и нефтехимические производства.



Рис. 1.3. Анализ вклада стационарных источников по видам экономической деятельности в общий объем загрязнения атмосферного воздуха в 2014 году

К городам, в загрязнение которых наибольший вклад вносят предприятия химической и нефтехимической промышленности, относятся Кемерово, Москва, Санкт-Петербург, Тюмень, Уфа, Красноярск, Воронеж, Саратов, Киров и другие. Наибольший вклад предприятиями нефтеперерабатывающей промышленности вносится в загрязнение Саратова, Рязани, Самары, Уфы, Ярославля и других [33].

К основным ЗВ относятся формальдегид, бенз(а)пирен, оксиды азота, диоксид серы, оксид углерода, взвеси и аммиак. Более 65 млн жителей России ежегодно подвергаются вредному воздействию этих и ряда других веществ в концентрациях, превышающих ПДК. Растут объемы загрязнения оксидами азота. С 1998 по 2006 годы его содержание в воздухе выросло на 11 % [33].

Для стационарных источников загрязнения наибольший объем выбросов в 2014 году был зафиксирован для оксида углерода (4938,4 тыс. т), диоксида серы (4036,3 тыс. т), твердых веществ (1922,2 тыс. т), оксидов азота (1805,5 тыс. т) и летучих органических соединений (1340 тыс. т) [28]. Сравнительная диаграмма, показывающая соотношение ЗВ в общем объеме промышленного загрязнения атмосферного воздуха представлена на рис. 1.4. При этом в обзоре [32] отмечается, что за период 2010 – 2014 гг. средние за год концентрации диоксида серы снизились на 8 %, диоксида азота – на 7 %, оксида азота – на 13,5 % и оксида углерода на 15 %.

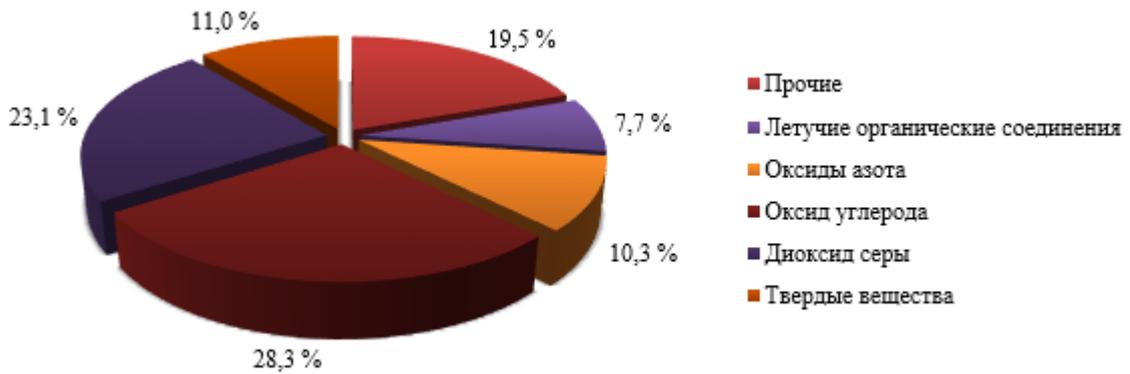


Рис. 1.4. Соотношение загрязняющих веществ в общем объеме от стационарных источников загрязнения атмосферного воздуха в 2014 году

Важно отметить, что отсутствие в вышеприведенном списке аммиака связано с тем, что его концентрации определяются только в 75 городах на 182 станциях контроля (менее 30 % от числа городов, где проводятся наблюдения). Средняя за 2014 год концентрация аммиака по городам России составляет 24 мкг/м^3 . За период 2010 – 2014 гг. этот показатель снизился на 7,7 % [30]. Наибольшие показатели среднегодовых концентраций аммиака в различные годы имели место в Санкт-Петербурге – 133 мкг/м^3 (в 2007 г.), Кемерове – 126 мкг/м^3 (в 2004 г.), Москве – 120 мкг/м^3 (в 1998 г.) [33].

По данным Государственного доклада [28] в период 2008 – 2014 гг. среднегодовые выбросы аммиака от стационарных источников значительно увеличились (более чем на 10 тыс. т), и в 2014 году составили 51 тыс. т. (рис. 1.5).

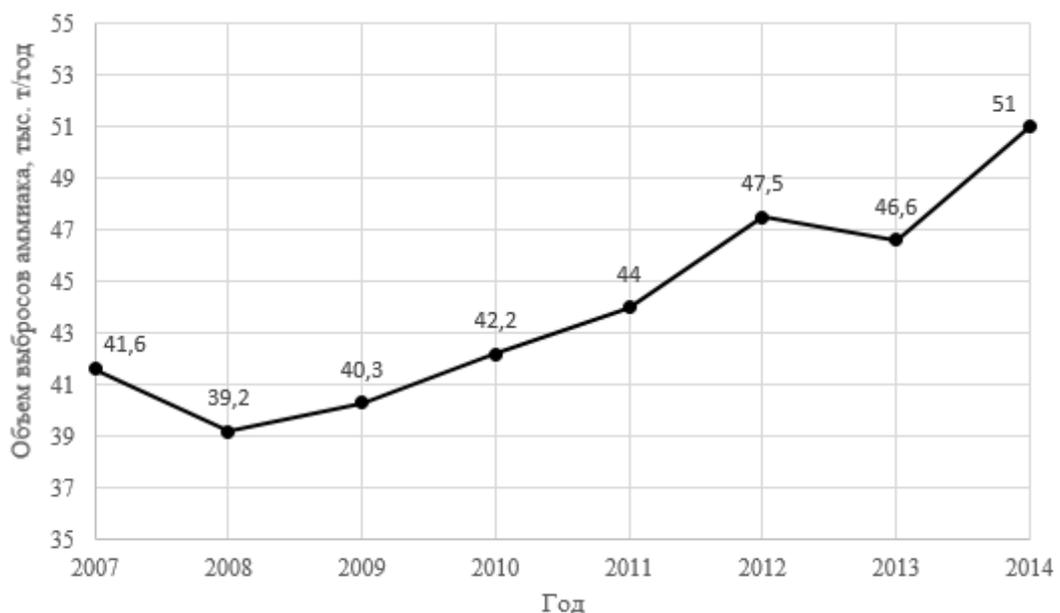


Рис. 1.5. Объемы выбросов аммиака от стационарных источников загрязнения

В Российской Федерации около 3000 химически опасных объектов (ХОО), в случае аварийных выбросов на которых могут произойти катастрофические последствия, связанные с большим количеством человеческих жертв и пострадавших. К таким объектам относятся не только хранилища газообразных или сжиженных сильнодействующих ядовитых веществ (СДЯВ), но также трубопроводное оборудование и любой вид транспорта, занимающийся их перевозкой. Примерами наиболее опасных СДЯВ в силу объемов их производства и хранения, а также из-за возможных последствий для человека и ОС могут быть аммиак и хлор.

Производство аммиака, который является одним из важнейших продуктов химической промышленности, с каждым годом растет и на данный момент в мире производится около 150 млн. т в год этого вещества, причем в России этот показатель составляет примерно 10 % от общего объема. За период 2010 – 2014 гг. объем производства в РФ увеличился на 1,3 млн. т в год (рис. 1.6) [34].

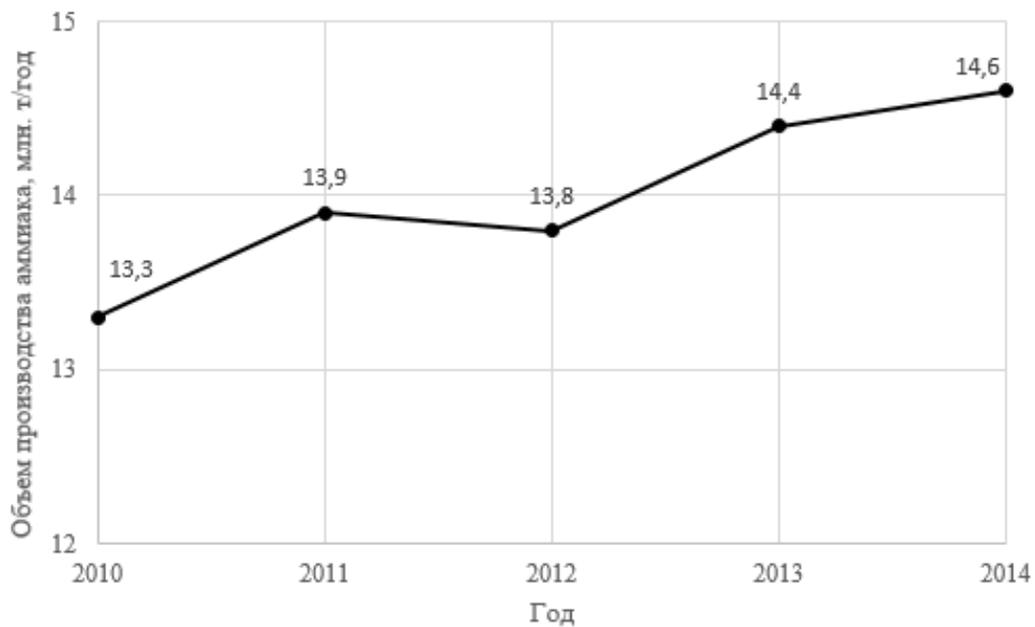


Рис. 1.6. Производство аммиака в России

Наряду с аммиаком, еще одним наиболее распространенным опасным химическим веществом (ОХВ) на ХОО является хлор [35]. Эти СДЯВ используются как исходное сырье, промежуточные, побочные и конечные продукты, растворители, средства обработки. Как правило, большая их часть на производящих или потребляющих предприятиях находится в хранилищах (70 – 80 %), остальная часть в технологической аппаратуре или транспортных средствах. Всего же в Западной Европе на душу населения приходится следующее удельное количество летальных доз СДЯВ, использующихся в производстве:

- хлор – 10 трлн.;
- аммиак, синильная кислота – 100 млрд.;
- барий – 5 млрд.;
- мышьяк – 500 млн.

Наиболее опасными с учетом фактора внезапности и тяжести последствий являются атмосферные выбросы ЗВ в результате техногенных ЧС. В период 2007 – 2011 гг. на объектах нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности таких ЧС было 13, что составило 15 % от общего числа аварий в этой отрасли. В основном эти опасные события возникли по организационным причинам (более 70 %), таким как нарушение технологии производства работ, неправильная организация производства работ, неэффективность производственного контроля, умышленное отключение средств защиты и другим подобным инцидентам, и только 30 % по техническим причинам [36].

На предприятиях химического комплекса по данным информационных бюллетеней Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору [37] за период 2004 – 2011 гг. произошло 75 аварий, где пострадали люди. Динамика аварийности и травматизма по годам представлена на рис. 1.7. В этот список включены аварии с выбросом ОХВ, разгерметизацией оборудования, взрывом и пожаром. Так, в 2011 году было зафиксировано 8 аварий, причем из них 2 с выбросом ОХВ и 3 с разгерметизацией оборудования. Последствием этих аварий стала гибель 3 людей.

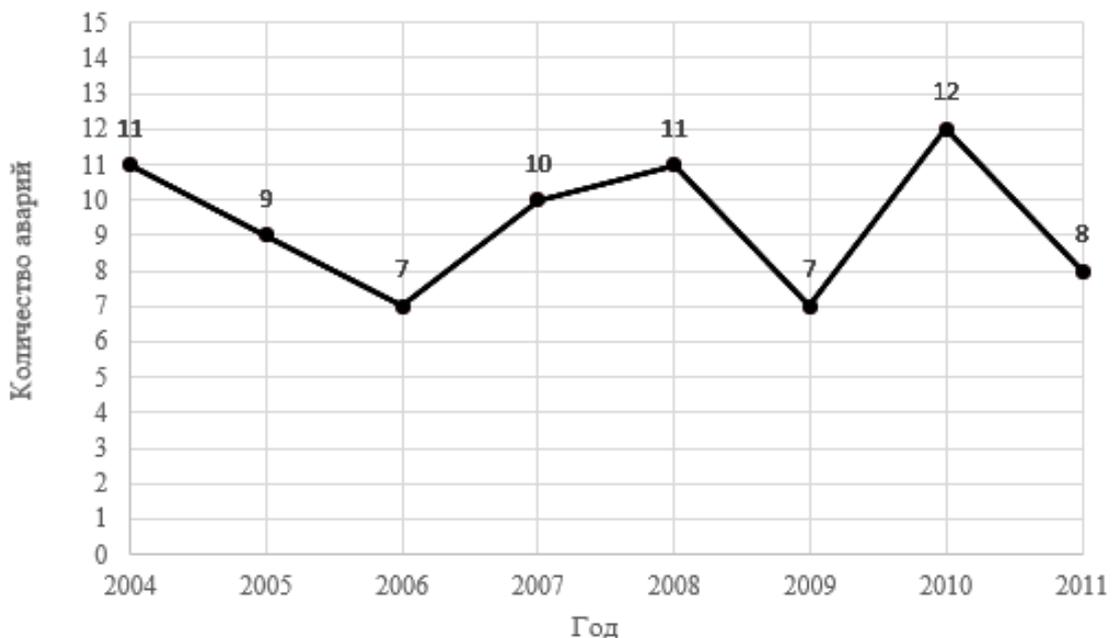


Рис. 1.7. Динамика аварийности с несчастными случаями

Из графика (рис. 1.7) видно, что число аварий, где пострадали люди, по годам остается достаточно стабильным и колеблется около 10 ежегодно. При этом количество несчастных случаев в последние годы неизменно падает, что объясняется повышением требований инспекторского состава химнадзора к производственному персоналу подконтрольных предприятий, а именно к выполнению требований правил и норм промышленной безопасности.

Другой вид техногенных катастроф с выбросом ЗВ в атмосферу – транспортные происшествия, случившиеся при перевозке ОХВ. По данным [35] в России на железных дорогах одновременно находятся в пути 650 – 700 цистерн со СДЯВ, в частности резко возросли перевозки сжиженного хлора. Такое же количество СДЯВ находится на загрузочно-разгрузочных работах, на которых так же велика вероятность возникновения ЧС с выбросом ОХВ в атмосферный воздух.

1.2. Классификация задач анализа последствий аварийного загрязнения атмосферы промышленными источниками

Классификация источников загрязнения атмосферы

В данной диссертационной работе используется классификация источников загрязнения атмосферы (ИЗА) (рис. 1.8 – 1.10), полученная путем анализа и последующей систематизации данных из литературных источников [3, 8, 38 – 41]. В соответствии с этой классификацией, все ИЗА по происхождению можно разделить на антропогенные и естественные (природные).

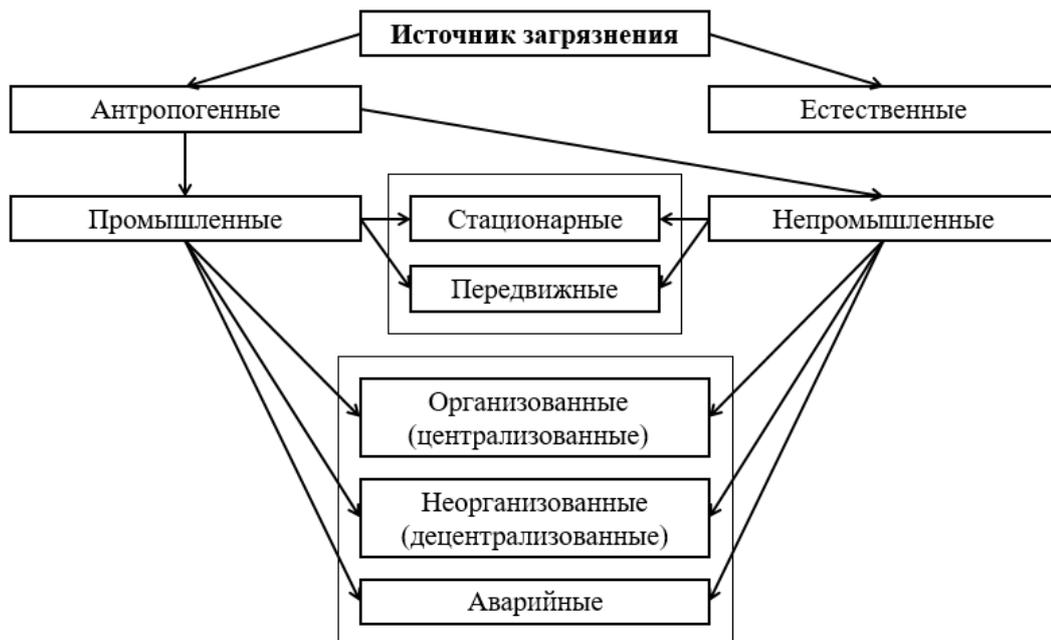


Рис. 1.8. Классификация основных источников загрязнения атмосферного воздуха

Наибольший вклад в загрязнение атмосферы вносят источники естественного происхождения [17]. Сравнительный анализ ИЗА показывает, что производительность естественных источников по большинству основных ЗВ превышает производительность антропогенных в 10 и более раз (таблица 1.1). Но так как они расположены, как правило, в удалении от мест сосредоточения населения, особой опасности для здоровья человека не представляют. Поэтому далее более подробно рассмотрена классификация только антропогенных ИЗА.

Таблица 1.1.

**Производительности антропогенных и естественных источников
загрязнения по основным загрязняющим веществам**

| Примесь | Источники загрязнения | | Производительность, млн. т в год | |
|----------------|---|---|-------------------------------------|--------------|
| | Антропогенные | Естественные | Антропогенные | Естественные |
| Аммиак | Обработка отходов | Биологическое разложение | 4 | 100–200 |
| Сероводород | Химические процессы, переработка сточных вод | Вулканы, биологические процессы в болотах | 3 | 100–300 |
| Сернистый газ | Сжигание угля и нефти, переработка серных руд | Вулканы | 146 | 6–12 |
| Диоксид азота | Сжигание | Жизненная деятельность бактерий в почвах | 50 | 60–270 |
| Закись азота | При использовании азотистых удобрений | Биологические процессы в почвах | более 17 | 100–450 |
| Окись углерода | Сжигание, автомобильные выхлопы | Лесные пожары, терпеновые реакции | 300 | более 3000 |
| Углеводороды | Сгорание, выхлоп, химические процессы | Биологические процессы | 88 | 500–1600 |
| Углекислый газ | Сжигание | Биологическое разложение | 15000 | 150000 |

К основным антропогенным ИЗА, которые связаны с выделением больших объемов специфических токсичных веществ, можно отнести промышленные предприятия, тепловые электростанции, транспорт и сельскохозяйственные комплексы. Все эти источники выделяют немалое количества специфических токсичных веществ, которые не всегда удается сразу идентифицировать [42].

По степени организованности антропогенные ИЗА делятся на организованные (централизованные), неорганизованные (децентрализованные) и аварийные.

Если выделение ЗВ в атмосферу связано с деятельностью предприятия промышленности, то ИЗА является промышленным, в противном случае – непромышленным.

К организованным промышленным ИЗА относятся выбросные трубы, шахты, аэрационные фонари, фрамуги и другие. К неорганизованным промышленным ИЗА – открытые склады минерального сырья, карьеры, хранилища твердых и жидких отходов, негерметичное оборудование, транспортные эстакады и другие.

К непромышленным выбросам можно отнести, например, системы канализации, как организованный ИЗА, и выбросы автотранспорта, как неорганизованный.

Объект будет являться аварийным промышленным или непромышленным ИЗА, в случае произошедшей на нем аварии, которая будет сопровождаться выбросом ЗВ в атмосферу.

Помимо этого, если антропогенный ИЗА меняет положение в пространстве с течением времени, то он считается передвижным или мобильным, иначе – стационарным.

Промышленные организованные ИЗА наиболее распространены в современном индустриальном мире и, как правило, находятся в непосредственной близости к местам скопления людей (населенные пункты, рабочие зоны и другие).

ИЗА такого типа могут быть постоянно действующими (запланированными) с равномерным валовым выбросом или выбросом, меняющимся по определенному закону, и периодическими (рис. 1.9).

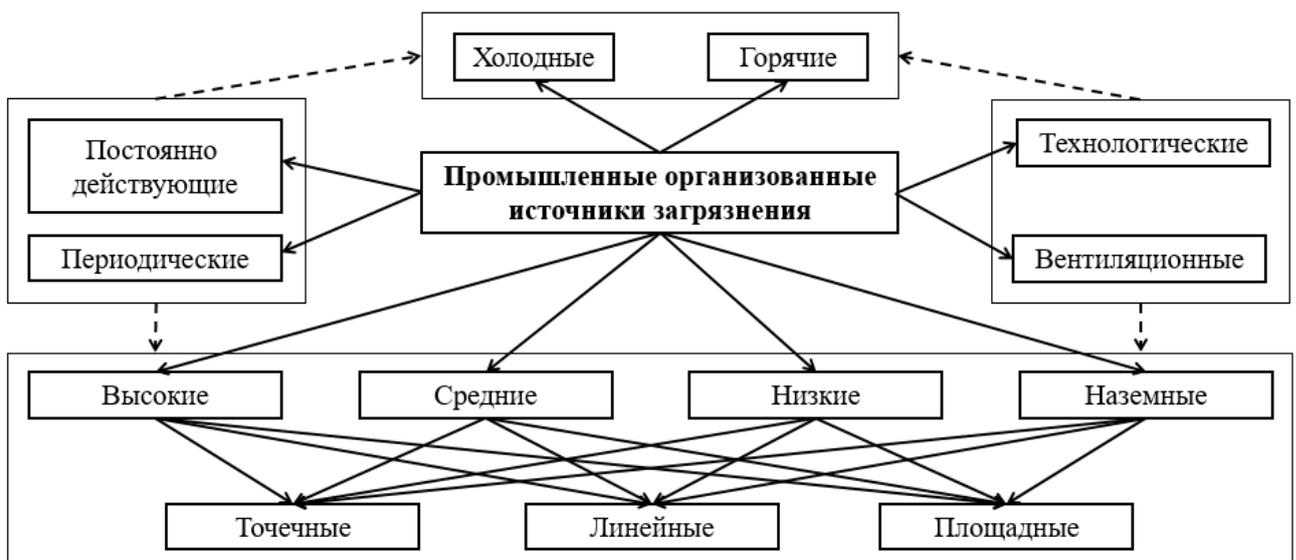


Рис. 1.9. Классификация промышленных организованных источников загрязнения атмосферного воздуха

По типу систем, из которых выбрасываются вредные вещества, промышленные организованные ИЗА делятся на технологические и вентиляционные.

По высоте расположения устья ИЗА могут быть наземными (высота менее 2 метров), низкими (2 – 10 метров), средними (10 – 50 метров) и высокими (более 50 метров).

Наземными ИЗА являются: находящиеся на территории промышленной площадки нерегламентированные выбросы типа утечек из газгольдеров, пылевыведения при нарушении поверхностного слоя загрязненной почвы во время земляных работ и при движении автотранспорта, сжигание загрязненной тары, одежды и другие.

Через низкие ИЗА осуществляются выбросы в атмосферу вентиляционного воздуха и технологических сдувов. К ним относятся выбросные трубы, шахты, дефлекторы и другие. Выбросы этих источников производятся непосредственно в зону аэродинамической тени, которую создают здания и сооружения, тем самым загрязняя в основном территорию около этих зданий и сооружений.

Выбросные трубы и шахты, нижняя отметка которых находится более чем на 20 % выше границы зоны аэродинамической тени, а верхняя не превышает границы переходной области, относятся к средним ИЗА.

Высокие ИЗА чаще всего распространены для выброса технологических газов и загрязненного вентиляционного воздуха. К ним относятся трубы, выбросы от которых хорошо рассеиваются, так как производятся в верхние слои атмосферы.

По характеру организации в пространстве промышленные централизованные ИЗА делятся на точечные, линейные и площадные.

Отдельно стоящие ИЗА относятся к точечным, причем в частных случаях некоторые площадные источники могут приниматься за точечные.

Если размер устья источника соизмерим с его высотой либо превышает ее, то ИЗА является линейным, например, аэрационный фонарь. Так же когда несколько точечных источников расположены вдоль одной прямой, их можно принять за один линейный ИЗА.

Если точечные ИЗА равномерно распределены в пределах ограниченной территории предприятия или города, то в этом случае говорят о площадном ИЗА.

По температуре выбрасываемой газовой смеси промышленные организованные ИЗА делятся на горячие (нагретые) и холодные [43].

С экологической и социальной точек зрения наибольшую угрозу представляют промышленные аварийные ИЗА, поэтому именно они являются главными объектами исследования в данной работе (рис. 1.10).

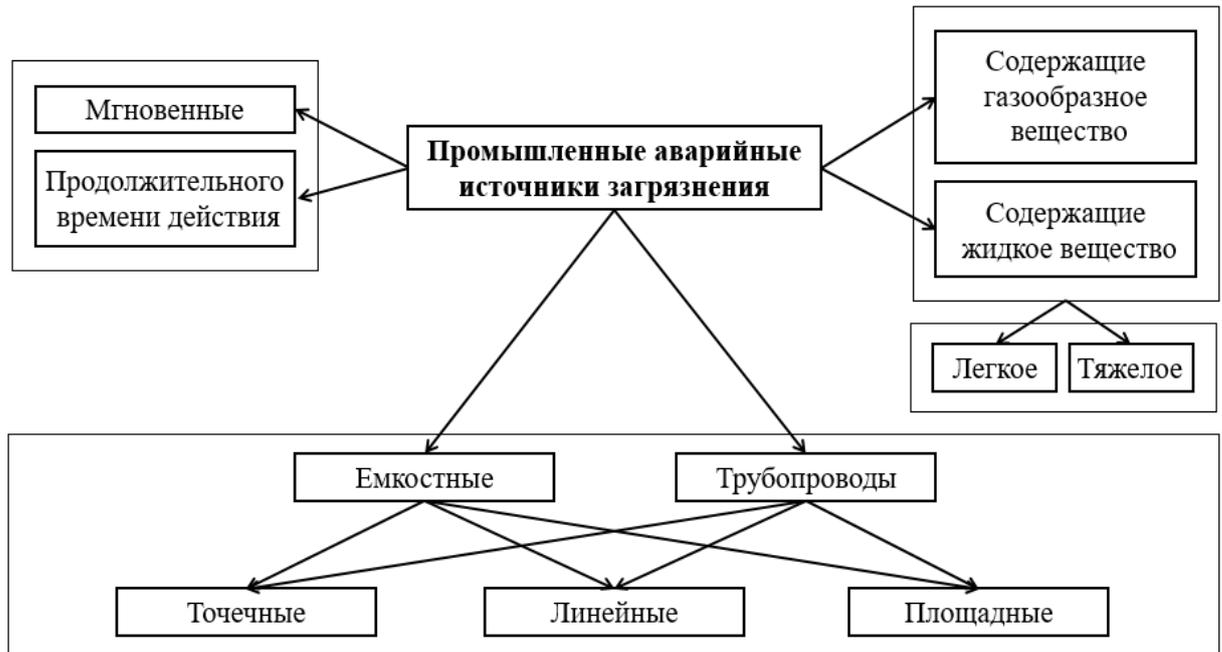


Рис. 1.10. Классификация промышленных аварийных источников загрязнения атмосферного воздуха

По времени действия промышленные аварийные ИЗА делятся на мгновенные (залповые) и продолжительного времени действия. В первом случае ЗВ выбрасывается в течение небольшого интервала времени, который много меньше, чем период дальнейшего воздействия облака примеси на какую-либо территорию. Во втором случае время действия источника и время воздействия облака ЗВ на какую-либо территорию соизмеримы.

По агрегатному состоянию выбрасываемого ЗВ аварийные ИЗА делятся на содержащие вещества в сжиженном состоянии и содержащие газообразные вещества, причем если оно легче воздуха и имеет тенденцию подниматься вверх, то газообразное вещество является легким (например, аммиак), в противном случае – тяжелым (например, хлор). Аварийный источник с жидким веществом всегда является ИЗА продолжительного времени действия, а источник, содержащий газообразное вещество, может быть как мгновенным, так и продолжительного времени действия.

В качестве аварийного ИЗА могут быть емкости или трубопроводы, причем в результате их разрушения или частичной разгерметизации, в зависимости от агрегатного состояния выбрасываемого ЗВ, получаемый аварийный источник может быть точечным, линейным или площадным. Например, площадной ИЗА может об-

разоваться в результате разрушения емкости, содержащей значительное количество сжиженного вещества, следствием чего стало его растекание по поверхности земли окружающей территории.

В настоящей диссертационной работе в качестве примеров антропогенных промышленных ИЗА рассматриваются аварийные источники, не меняющие положение в пространстве с течением времени (стационарные) (рис. 1.8). Данные источники представляют из себя емкости, содержащие газообразное или жидкое вещество, в результате частичного или полного разрушения которой образуется точечный (например, разгерметизация оборудования) или площадной (например, разлив ЗВ) ИЗА мгновенного или продолжительного времени действия (рис. 1.10).

Классификация задач оценки последствий выбросов загрязняющих веществ в атмосферу

Так же в данной диссертационной работе предложена классификация задач ОВОС выбросов ЗВ в атмосферный воздух (рис. 1.11), которая была получена при анализе и последующей систематизации информации из источников [39, 44].

Основными задачами ОВОС выбросов ЗВ в атмосферу являются следующие: прогнозирование загрязнения атмосферного воздуха, идентификация ИЗА и поддержка принятия решений (ППР) по предотвращению, локализации, ликвидации последствий, минимизации ущерба, эвакуации персонала и населения близлежащих территорий (рис. 1.11).



Рис. 1.11. Классификация задач экологической безопасности атмосферного воздуха

Задачи прогнозирования загрязнения атмосферного воздуха можно классифицировать по двум признакам, а именно по времени и объекту прогнозирования.

По временному признаку прогнозирование делится на долгосрочное и оперативное. К долгосрочному относится прогнозирование загрязнения атмосферного воздуха на длительный период времени (от нескольких дней до нескольких лет). Данный вид прогнозирования наиболее часто применим к постоянно или периодически действующим (с заданными периодами действия) организованным промышленным ИЗА. Также оно применяется для потенциальных промышленных аварийных ИЗА, например, прогнозирование поведения ЗВ в случае возможной аварии на определенном объекте на различные времена года.

Оперативное прогнозирование проводится на период времени, как правило, до нескольких часов. В основном это применимо для промышленных аварийных ИЗА и базируется на обработке информации о концентрациях примесей ЗВ и метеоусловий, собранной по результатам наблюдений за предшествующие периоды времени со станций контроля и передвижных лабораторий в аналогичных случаях.

Объектами прогнозирования являются различного рода зависимости, такие как профили и максимальные концентрации ЗВ, токсодозы, ЗЗ.

Профили концентрации для заданного момента времени показывают, как изменяется концентрация вдоль оси направления ветра (продольные профили концентрации), перпендикулярно оси направления ветра (поперечные) и относительно высоты от поверхности земли (вертикальные). Для точки с фиксированными координатами в пространстве получают профиль изменения концентрации во времени.

По максимальным концентрация определяют уровень превышения средне суточной ПДК, максимально разовой и в воздухе рабочей зоны. Уровень превышения ПДК подразделяется на пять степеней опасности: очень высокий, высокий, средний, низкий или превышение отсутствует.

Так же одной из основных задач прогнозирования заражения атмосферного воздуха является определение токсодоз в фиксированной точке пространства или с учетом траектории движения человека [45]. По степени поражения токсодозы подразделяются на четыре категории:

- пороговая, при которой проявляются первые слабые признаки отравления;
- легкая – не значительное отравление;
- поражающая (выводящая из строя) – существенное отравление;
- смертельная (летальная), при которой человек впадает в кому или наступает его смерть.

В рамках диссертационной работы в разработанной ИС «ЯНСКА» реализованы функции, позволяющие получить продольные и поперечные профили концентрации, а также профили концентрации во времени для заданного периода прогнозирования (для любой точки пространства, в котором происходит прогнозирование распространения ЗВ), максимальные концентрации ЗВ, токсодозы и мгновенные ЗЗ.

Компьютерная система «ЯНСКА» используется для оперативного прогнозирования, а также для частных случаев долгосрочного. Благодаря полученным результатам, в случае аварии на ХОО, имеется возможность спланировать пути эвакуации как персонала, так и жителей ближайших населенных пунктов, а также принять решения, позволяющие минимизировать последствия аварии и возможный ущерб.

Классификация методов решения задач оценки последствий выбросов загрязняющих веществ в атмосферу

Классификация методов решения задач ОВОС выбросов ЗВ в атмосферный воздух составлена для трех типов задач: прогнозирования загрязнения, идентификации ИЗА и ППР (рис. 1.11).

Известные методы прогнозирования загрязнения атмосферного воздуха [4, 8, 46] можно разделить на: расчетные, статистические и методы ИИ.

Для долгосрочного прогнозирования применяются расчетные модели, полученные на основе теории диффузии, такие как модель «клубка», «факела», «ящика» и конечно-разностные. Так, например, для расчета выбросов наземных ИЗА используют модель «клубка», а для расчета выбросов низких, средних и высоких ИЗА – модель «факела» [39].

Некоторые из перечисленных выше моделей были предложены научной школой профессора Берлянда М. Е [8], и на данный момент времени они являются базой для методики ОНД-86 [43]. Но на практике их применение не всегда оправданно из-за неопределенности метеоусловий и топографии местности, тем самым достоверный прогноз загрязнения атмосферного воздуха можно получить только для равнинной местности с учетом постоянности метеоусловий.

Для оперативного прогнозирования применяются расчетные (например, модель «клубка», «факела» [39]), статистические (метод группового учета аргументов [47, 48], минимаксный подход [49]), эмпирико-статистические (модель длительного загрязнения местности аэрозольными источниками [50]) и методы ИИ (нейросетевые модели [51], ЯНМ [52, 53]).

В настоящей диссертационной работе методом решения задач анализа последствий аварийного загрязнения воздуха промышленными источниками является ячеечно-нейросетевое моделирование.

Основным достоинством методов ИИ является способность быстрой обработки оперативных данных. Так, например, однократное обучение ИНС позволяет получать результаты прогнозирования практически мгновенно, что является важным показателем в случае оперативного прогнозирования загрязнения воздуха. Данное качество характерно и для разработанной в рамках диссертационной работы ИС «ЯНСКА».

1.3. Систематизация экспериментальных данных для оценки последствий аварийных выбросов и примеров реальных промышленных аварий

Анализ аварийной опасности веществ и соединений, используемых на химических производствах

С каждым годом изделия и продукция химического производства находят все более и более широкое распространение, в связи с чем постоянно растут объемы химического производства и количество ХОО. По данным [54] в России насчитывается свыше 3-х тысяч ХОО, в сфере производства которых используются аварийно химически опасные вещества (АХОВ) в количествах опасных для производственного персонала и проживающего вблизи населения.

На сегодняшний день самым распространенным АХОВ, который используется на ХОО, является сжиженный аммиак. Он используется примерно на 1,9 тысячах объектов, что составляет около 60 % от общего числа ХОО. На втором месте – хлор, который используется на 0,9 тысячах объектов (30 %). Ниже приведен список наиболее распространенных АХОВ с их ПДК в воздухе рабочей зоны и населенных пунктов [55, 56], а также краткое описание каждого вещества в отдельности [54]. Все основные свойства этих веществ были систематизированы и сведены в таблицу 1.2.

Аммиак (NH_3) – бесцветный газ с резким характерным запахом, в 1,7 раза легче воздуха (плотность по воздуху – 0,597), хорошо растворяется в воде (при 20° С в одном объеме воды растворяется 700 объемов аммиака), кипит при температуре выше -33,4° С и затвердевает при температуре ниже -77,8° С.

Горюч, смесь аммиака с воздухом взрывоопасна (пределы концентрации воспламенения от 15 до 28 % по объему).

**Основные свойства наиболее распространенных аварийно
химически опасных веществ в воздухе**

| Наименование вещества | Формула | Температура, °С | | Тяжелее или легче воздуха | Растворимость в воде | Горючесть | ПДК в воздухе рабочей зоны, мг/м ³ | ПДК в воздухе населенных пунктов, мг/м ³ | |
|-----------------------|------------------|-----------------|--------|---------------------------|----------------------|-----------|---|---|------------------|
| | | Кип. | Плав. | | | | | Максимальная разовая | Средняя суточная |
| Аммиак | NH ₃ | -33,4 | -77,8 | легче | да | да | 20 | 0,2 | 0,04 |
| Сероводород | H ₂ S | -60,4 | -85,6 | тяжелее | да | да | 10 | 0,008 | - |
| Синильная кислота | HCN | 25,6 | -14 | легче | да | да | 0,3 | - | 0,01 |
| Хлор | Cl ₂ | -34,1 | -101,0 | тяжелее | нет | нет | 1 | 0,1 | 0,03 |
| Хлористый водород | HCl | -85,1 | -114,2 | тяжелее | да | нет | 5 | 0,2 | 0,2 |

В производстве аммиак используется при изготовлении азотной и синильной кислот, соды и многих других неорганических веществ, удобрений; в органическом синтезе; при крашении тканей; в холодильных установках в качестве хладагента. Растворы аммиака известны под названиями «нашатырный спирт» (10 % раствор аммиака) и «аммиачная вода» (18 – 20 % раствор аммиака), которая используется в качестве удобрений.

Порог ощущения аммиака – 0,037 г/м³. ПДК в воздухе рабочей зоны – 0,02 г/м³. При концентрациях 0,04 – 0,08 г/м³ наблюдается резкое раздражение глаз, верхних дыхательных путей, кашель, головная боль. Опасная для жизни концентрация – 0,35 – 0,7 г/м³, которая может вызвать смерть от сердечной слабости и остановки дыхания. Газообразный аммиак при концентрации равной 0,28 г/м³ вызывает раздражение горла, 0,49 г/м³ – раздражение глаз, 1,2 г/м³ – вызывает кашель, 1,5 – 2,7 г/м³ – приводит к смертельному исходу при воздействии в течении 0,5 – 1 часа.

Сжиженный аммиак при контакте с кожей приводит к обморожению различной степени, также возможны ожоги и изъязвления на коже.

Для защиты органов дыхания от паров аммиака при концентрации аммиака в воздухе не более 15 ПДК используют респираторы, при концентрации порядка 750 ПДК – фильтрующие противогазы, а при больших концентрациях или в условиях неизвестности – изолирующие противогазы. Для защиты кожных покровов от попадания аммиака, находящегося в капельножидком состоянии, используют прорезиненные костюмы, сапоги и перчатки [54].

Сероводород (H_2S) – бесцветный газ с неприятным запахом, тяжелее воздуха в 1,2 раза, хорошо растворим в воде и во многих органических растворителях. Кипит при температуре выше $-60,4^\circ \text{C}$ и затвердевает при температуре ниже $-85,6^\circ \text{C}$. Горюч, смесь сероводорода с воздухом взрывоопасна (пределы концентрации воспламенения от 4,3 до 46 % по объему).

Используется в производстве серы, серной кислоты, сульфидов, серосодержащих органических соединений. Сероводород является побочным продуктом при очистке природного и коксового газов и нефти.

ПДК в воздухе рабочей зоны – $0,01 \text{ г/м}^3$. При вдыхании опасен. При концентрации $0,3 - 0,5 \text{ г/м}^3$ через 15 – 30 мин появляются симптомы поражения; при $1,2 \text{ г/м}^3$ возможен летальный исход уже через несколько минут.

Для защиты органов дыхания используют промышленные и гражданские противогазы, а также некоторые модели респираторов [54].

Синильная кислота (HCN) – бесцветная, легколетучая подвижная жидкость, имеет запах миндаля. Пары синильной кислоты чуть легче воздуха (относительная плотность паров – 0,9). Хорошо растворяется в воде и некоторых органических растворителях, например, в спирте, бензине, эфире. Температура кипения кислоты $25,6^\circ \text{C}$, температура плавления составляет -14°C . Образующиеся пары в смеси с воздухом взрывоопасны (пределы концентрации воспламенения от 5,6 до 40 % по объему).

В производстве синильную кислоту используют для получения аминокислот, акрилонитрила, при изготовлении пластмасс. В сельском хозяйстве – для борьбы с вредителями.

ПДК в воздухе рабочей зоны – $0,0003 \text{ г/м}^3$. При вдыхании паров кислоты поражаются органы дыхания. При концентрации $0,1 \text{ г/м}^3$ через 15 мин происходит тяжелое поражение легких, а при большем пребывании возможен смертельный исход. Также синильная кислота, как в жидком, так и в газообразном состояниях проникает в организм через кожу. При концентрациях более $0,5 \text{ г/м}^3$ при длительном пребывании в противогазе, но без средств защиты кожи, появляются симптомы отравления.

Для защиты органов дыхания используют промышленные и гражданские противогазы [54].

Хлор (Cl_2) – газ с резким раздражающим запахом, имеет зеленовато-желтый окрас. Хлор в 2,5 раза тяжелее воздуха, в следствии чего зараженное облако скапливается в низких участках местности. Плохо растворяется в воде (0,07 %), но хорошо – в некоторых органических растворителях. Кипит при температуре выше

-34,1° С и затвердевает при температуре ниже -101° С. Негорюч, но пожароопасен при контакте с горючими веществами.

В производстве хлор используется для отбеливания тканей и бумажной массы; для изготовления пластмасс, каучуков, инсектицидов, растворителей; в цветной металлургии; в коммунально-бытовом хозяйстве для обеззараживания питьевой воды и других целей.

ПДК в воздухе рабочей зоны – 0,001 г/м³. При воздействии на организм поражает дыхательную систему. При концентрации 0,01 г/м³ проявляется раздражающее действие хлора, при концентрации 0,25 г/м³ возможен смертельный исход при воздействии в течении уже 5 минут.

Для защиты органов дыхания используют промышленные и гражданские противогазы, при высоких концентрациях – изолирующие противогазы. Для защиты от попадания на кожу используют специальные костюмы из устойчивых к воздействию хлора материалов [54].

Хлористый водород (HCl) – газ с резким запахом, который дымится на воздухе, тяжелее воздуха в 1,3 раза. Кипит при температуре выше -85,1° С и затвердевает при температуре ниже -114,2° С. Негорюч, взрывоопасен при нагревании в емкости. Хорошо растворим в воде. Водный раствор хлористого водорода известен под названием «соляная кислота».

Используется в производстве хлоридов металлов, синтетических смол, каучуков, органических красителей, гидролизного спирта, сахара, желатина, клея, для дубления и окраски кожи, при производстве активированного угля, крашении тканей, травлении металлов, в металлургии и нефтедобыче.

ПДК хлористого водорода в воздухе рабочей зоны составляет 0,005 г/м³. При 0,015 г/м³ происходит раздражение слизистых оболочек верхних дыхательных путей. Концентрации 0,05 – 0,07 г/м³ переносятся с трудом.

Как правило, отравление происходит не самим хлористым водородом, а туманом соляной кислоты, который образуется при взаимодействии газа с водяными парами воздуха. Эти пары действуют на организм не только через органы дыхания, но и через кожу. Для защиты органов дыхания используют промышленные и гражданские противогазы. Для защиты кожи – костюмы из кислотостойкой ткани и сапоги и перчатки из кислотостойкой резины [54].

Описанные выше ОХВ зачастую используются в химических производствах, и, как следствие, зафиксировано немалое количество аварий с их участием. Из-за высокой токсичности этих веществ в результате аварий, как правило, наносится

огромный вред ОС, а также здоровью людей, попавших под их воздействие. Наиболее крупные аварии с выбросом ОХВ и их последствия описаны ниже. Исходя из актуальности этой проблемы, в рамках данной диссертационной работы разработана ИС «ЯНСКА», позволяющая при аварии в кратчайшие сроки в зависимости от метеоусловий оценить наиболее опасные сценарии распространения ОХВ в воздухе и, используя эту информацию максимально возможно, снизить ее неблагоприятные последствия.

Экспериментальные данные по исследованию аварийной опасности химических веществ

Любая, зачастую реализованная с помощью программно-алгоритмических средств, математическая модель, которая заменяет исходный объект (в данном случае описанную выше сложную систему), для получения необходимых сведений о нем должна как можно точнее отображать физические свойства этого объекта и его отклик на входные переменные. Для подтверждения реалистичности модели используются различные методы, такие, как критический анализ, оценка адекватности, верификация и другие.

Под адекватностью модели подразумевается:

- правильное качественное описание рассматриваемых свойств объекта: например, возможность на основании смоделированной ЗЗ в случае аварии на ХОО сделать правильные выводы о наиболее опасных участках зараженной территории и принять решения по наиболее безопасным путям эвакуации из зоны персонала и местного населения;
- правильное количественное описание этих свойств с некоторой разумной точностью.

Другими словами, модель можно считать адекватной, если она способна отображать заданные свойства изучаемого сложного технического объекта с погрешностью не выше заданной [57].

Так, в статье [58] сравниваются результаты, полученные в экспериментах по рассеянию газов и рассчитанные по методикам, которые основаны на модели тяжелого газа [59 – 61] и распределении Гаусса для концентрации выброшенного газа [62 – 64]. В качестве экспериментальных данных выбраны результаты опытов серии Торней Айленд (Великобритания) [65, 66]. Эти опыты наиболее достоверны, подробно описаны, имитируют длительные аварийные выбросы ОХВ.

Серии экспериментов Торней Айленд насчитывают десятки опытов. Авторами [58] для оценки адекватности моделей используются результаты опытов

045 – 047, в которых осуществлялся продолжительный выброс фреоно-азотной смеси, рассеяние выброса происходило над ровным полем (характерный размер шероховатости 0,018 м). В опытах регистрировались метеорологические параметры, концентрации выброса на различных расстояниях от источника и на разных высотах с применением видео, кино- и фотосъемки. Краткая характеристика экспериментов приведена в таблице 1.3.

Таблица 1.3

Краткая характеристика экспериментов

| Номер опыта | 045 | 046 | 047 |
|--|------|------|------|
| Скорость ветра, м/с | 2,1 | 3,2 | 1,5 |
| Класс устойчивости атмосферы (по Пасквилу) | E/F | D | F |
| Интенсивность выброса, м ³ /с | 4,3 | 4,3 | 4,2 |
| Начальная плотность выброса относительно воздуха | 2,00 | 2,00 | 2,05 |

С точки зрения оценки адекватности описанных моделей достоинство опытов 045 – 047 в том, что они в достаточно хорошей степени соответствуют граничным условиям описанных моделей, то есть допускают задание начальных условий выброса в виде прямоугольного сечения с заданной концентрацией и соответствующим расходом через это сечение.

При оценке адекватности методик учитывались следующие требования:

- физическая достоверность (математическое описание явления может быть приведено с упрощениями, но без искажения имеющихся физических закономерностей и ограничений);
- удовлетворительное описание количественных характеристик и качественных тенденций, наблюдаемых в достоверных экспериментальных работах.

Результаты расчетов были получены при использовании: гауссовских методик для точечного источника (далее методика 1), для плоского площадного источника, расположенного перпендикулярно к направлению ветра (далее методика 2), с виртуальным точечным источником (далее методика 3) [62, 63]; «Токси-2»; методики рассеяния тяжелого газа «Токси-3».

Из всех использованных методик только в методике «Токси-3» учитывается изменение скорости ветра с высотой, в остальных методиках такого учета нет. Поскольку в моделируемых ситуациях изменение скорости ветра по высоте играло существенную роль, то было решено использовать при расчетах по методикам

1 – 3 и «Токси-2» не скорость ветра на высоте 10 м, а наблюдавшуюся в экспериментах скорость перемещения облака, соответствующую осредненной по слою у поверхности земли скорости ветра. Например, согласно экспериментальным данным, средняя видимая скорость движения облака в опыте 045 составляла 0,9 м/с, именно эта скорость и была принята в расчетах по методикам 1 – 3 и «Токси-2».

Кроме того, при расчете был сделан еще ряд допущений, связанных с особенностями подстилающей поверхности, начальным размером источника выброса.

Из результатов компьютерного моделирования экспериментов Торней Айленд видно [58], что гауссовские методики завышают концентрацию на оси ветра, по сравнению со значениями, наблюдаемыми в эксперименте. Наиболее точно результаты эксперимента описывает методика «Токси-3». Следует отметить, что гауссовская модель с использованием виртуального источника (методика 3), вообще говоря, не совпадает ни со стандартным гауссовским подходом, ни с методикой рассеяния тяжелого газа, хотя несколько ближе, чем стандартные гауссовские подходы, лежит к экспериментальным данным.

По полученным в результате вычислительного эксперимента концентрационным профилям авторы [58] заключили, что методика «Токси-3» более точно описывает и динамику процесса рассеяния. Об этом свидетельствует и такая характеристика, как ингаляционная доза. В таблице 1.4 приводятся дозы, рассчитанные с использованием всех пяти методик, и доза, определенная на основе экспериментальных данных. Методика «Токси-3» имеет наилучшее совпадение с опытом, остальные методики существенно завышают ингаляционную дозу – на величину до нескольких сотен процентов.

Таблица 1.4

Результаты расчета токсодоз по методикам оценки последствий химических аварий

| Методика | Расстояние от места выброса, м | | | | | |
|-------------|--------------------------------|---------------------------------------|--------------|---------------------------------------|--------------|---------------------------------------|
| | 36 | | 90 | | 250 | |
| | Доза, кг·ч/л | Ошибка по отношению к эксперименту, % | Доза, кг·ч/л | Ошибка по отношению к эксперименту, % | Доза, кг·ч/л | Ошибка по отношению к эксперименту, % |
| 1 | 92,4 | 711 | 19,2 | 201 | 3,33 | 550 |
| 2 | 32,6 | 186 | 14,3 | 125 | 3,17 | 519 |
| 3 | 17,5 | 53 | 7,47 | 17 | 2,15 | 320 |
| «Токси-2» | 52,6 | 361 | 17,4 | 173 | 3,44 | 571 |
| «Токси-3» | 12,1 | 6 | 4,02 | -37 | 0,660 | 29 |
| Эксперимент | 11,4 | 0 | 6,38 | 0 | 0,513 | 0 |

Еще одна характеристика, по которой проводилось сравнение с опытом, – размеры облака. В опытах устанавливалась, прежде всего, площадь, покрываемая шлейфом. Она определялась из условия превышения объемной доли исследуемого вещества в воздухе 0,1 %, что соответствовало пределу чувствительности датчиков. Полученные результаты показали, что все гауссовские методики дают узкую зону, ширина которой на расстоянии 500 м от точки выброса составляет около 100 м. Согласно экспериментальным данным наблюдалась ширина примерно в 4 раза большая: на расстоянии 500 м от места выброса – около 400 м, то есть гауссовские методики как минимум на 400 % недооценивают поперечный размер облака (с учетом использованных завышенных размеров шероховатости). Расчеты по методике «Токси-3» существенно лучше описывают размер облака: расчетная ширина завышена по отношению к экспериментальному значению примерно на 30 %. Возможная причина – наличие высокой травы.

Анализ размеров облака наиболее ярко показывает недостатки гауссовских моделей и преимущества методики «Токси-3». Этот пример иллюстрирует, что даже при сравнительно слабой интенсивности выброса, длительные выбросы все равно существенным образом растекаются по поверхности и долгое время распространяются вдоль нее, слабо диффундируя вверх. В гауссовских моделях отсутствует такое сильное растекание по поверхности и, наоборот, присутствует более интенсивное вертикальное рассеяние. Любопытно отметить, что гауссовские модели не только недостаточно точно описывают количественные характеристики облака, но даже качественное поведение выброса они могут описывать неправильно.

В рамках данной диссертационной работы на адекватность проверялись все ЯНМ, причем, каждая с различными структурами ИНС. Для определения лучшей нейросетевой структуры, в первую очередь, результаты, полученные с помощью ЯНМ с этой структурой, должны были быть адекватными. В качестве экспериментальных данных для определения адекватности ЯНМ использовались данные полученные по методике «Токси-3», так как анализ методик, описанный выше показал наилучшие результаты именно для этой методике. Далее из оставшихся структур ИНС выбиралась та, по которой средняя абсолютная ошибка выходных значений обучающей и тестовой выборок была минимальна.

Верификацию методик в широком понимании этого термина проводят как на реальных экспериментальных данных, так и на основе известных данных о фактически имевших место случаях аварий. Это связано с тем, что сам термин «верификация» переводится с английского языка как «проверка» (адекватности). В русском языке приняты и употребляются оба понятия, однако, чтобы их несколько

разграничить, для верификации чаще используются данные реальных аварийных выбросов, а не их экспериментальных имитаций. Примеры такой узконаправленной верификации приводятся в работах [67, 68].

Условия и последствия имевших место аварий с выбросом опасных химических веществ

В данном разделе рассмотрено 9 наиболее крупных аварий с выбросом таких веществ как хлор и аммиак, произошедших в период, начиная с 30-х годов прошлого века и по сегодняшний день, при различных производственных ситуациях (неисправность оборудования, авария при транспортировке ОХВ и так далее). Данные, которые имеются по этим авариям, используются для верификации различных методик и являются достаточным минимумом для оценки той или иной методики.

Авария 6 августа 2013 г. в городе Горловка (Украина)

Авария произошла на заводе ПАО «Концерн Стирол», который расположен в Донецкой области города Горловка. Данный инцидент имел место во время капитального ремонта завода №1. В межцеховом аммиачном коллекторе произошла разгерметизация трубопровода жидкого аммиака, который имел диаметр 150 мм и рабочее давление 12 атмосфер, в результате чего был выброс аммиака с образованием белого облака над заводом, которое быстро распространялось. Всего в воздух попало около 600 кг аммиака.

На момент аварии в цеху находилось примерно 100 человек из которых 6 человек погибло и 26 были госпитализированы. Среди жителей города Горловка обращений в больницу с отравлением аммиаком зафиксировано не было.

В городе в первое время после аварии чувствовался неприятный аммиачный запах. Позже Горловская санитарно-эпидемиологическая станция сообщила, что ПДК аммиака на расстоянии 500 и 1000 м от завода не превышали норму.

Авария при обращении с хлором 6 января 2005 г. в городе Грэнитвилль (штат Южная Каролина, США)

По информации из статьи [67] авария произошла ночью в промышленной зоне небольшого городка Грэнитвилль при столкновении двух поездов на железной дороге, в результате чего была разрушена цистерна, в которой находилось 82 т сжиженного хлора. Сцепкой соседнего вагона было пробито отверстие около 90 см в длину и 15 см в ширину.

Пострадало 563 человека, из них 9 человек погибли: машинист локомотива,

водитель грузовика, местный житель и шесть рабочих близлежащих предприятий. Среди пожарных, прибывших на место в первые минуты, было 6 пострадавших, один из которых провел в больнице несколько дней. Также среди пострадавших оказались 2 представителя шерифа, сразу приехавших на место катастрофы. В радиусе 1,5 км было эвакуировано 5400 человек местного населения. В радиусе 300 м был установлен режим, при котором люди допускались туда только в защитных костюмах.

Два человека, которые находились в локомотиве поезда, смогли самостоятельно выйти с места аварии и лишь пройдя около 100 м упали на землю. Их нашли рабочие расположенных поблизости фабрик и отвезли в больницу. Один из них погиб в больнице спустя несколько часов. Большинство людей, которые находились вблизи места аварии, предприняли попытку выйти из облака и оказались среди выживших. Одна из них, работница, дежурившая на одной из фабрик и находившаяся в 60 – 70 м от места выброса. Она сразу же вызвала службу спасения и через некоторое время, почувствовав запах хлора, вышла из зоны поражения.

Согласно результатам расследования [69] 8 из 9 погибших находились внутри помещений, в хлорном облаке около 10 мин.

Пострадавших могло быть и больше, но часть людей спаслась, забравшись на крыши либо выйдя из зоны поражения. Через несколько минут после аварии представители шерифа и пожарные начали выводить людей из зоны поражения. Примерно через 10 мин для населения было передано оповещение – плотно закрыть помещения. Через 20 мин в радиусе 1,5 км уже были перекрыты дороги к месту катастрофы. А спустя час спасатели в специальных костюмах подошли к месту аварии и начали вывод оставшихся там людей. Так, был спасен человек, которого заблокировало в автомобиле под деревьями, упавшими при столкновении поездов. Спустя более 2 ч после аварии были освобождены и успешно эвакуированы люди, запертые в помещениях находившихся неподалеку фабрик.

Облако хлора, по сообщению находившихся там людей, было низко стелющимся. Оно было вытянуто по направлению ветра на север приблизительно на 825 м, на юг на 300 м, и в боковом направлении на запад и восток на 330 м.

Согласно показаниям метеостанции, которая расположена на расстоянии 27 км от Грэнитвилля, температура воздуха составляла 13° С, скорость ветра около 2 – 3 м/с, направление ветра – юго-юго-западное. Кроме того, очевидцы отмечали, что на месте аварии ветер практически отсутствовал.

По данным [69] хлор при транспортировании находился при температуре

3° С. При разгерметизации цистерны произошло его вскипание, часть в охлажденном виде осталась в цистерне, часть жидкого хлора пролилась на подстилающую поверхность. По различным оценкам, в цистерне оставалось до половины содержимого. Хлор находился внутри цистерны еще несколько дней после аварии, и через отверстие происходила его эмиссия в ОС [67].

Авария 8 июля 2003 г. в компрессорном цехе ОАО «Любинский молочно-консервный комбинат»

Авария с групповым несчастным случаем произошла в компрессорном цехе, который предназначен для выработки холода. По данным источника [70] в качестве хладагента использовалось 11 т аммиака. Система охлаждения, на которой произошел сбой, состояла из 2 аккумуляторов холода с отделениями жидкости, маслоотделителя, компрессора, конденсатора, линейного ресивера, трубопровода и арматуры. Аккумуляторы холода были установлены на расстоянии 18,8 м от компрессорной станции на наружной площадке и примыкали к зданию главного корпуса комбината.

Когда произошла авария, компрессорный цех работал согласно технологическому регламенту в обычном режиме. Один аккумулятор холода находился в рабочем состоянии (давление паров аммиака в нем составляло 0,2 МПа), а второй в отключенном. В аккумуляторе холода, который был выключен, содержалось 300 кг аммиака и вода в объеме, соответствующем рабочему уровню (давление 0,5 МПа). Во время проверки машинистом согласно должностной инструкции давления и уровня воды в работающем аккумуляторе, произошли хлопок и выброс аммиака в атмосферу. Работники комбината, которые попали в зону распространения облака паров аммиака, получили отравление.

Причиной аварии стало разрушение отделителя жидкости. Оторванное верхнее днище найдено в 70 м от места аварии.

Также в [70] отмечается, что в момент локализации аварии, начался ливень. Это способствовало ускорению локализации облака аммиака.

Утечка хлора и хлористого водорода на территории Новомосковской акционерной компании «Азот» 18 июля 2002 г.

Газовое облако, которое содержало хлор и хлористый водород, образовалось в результате утечки этих газов из цехов «Электролиз-2», а также отделения хлористого водорода и установки получения гипохлорита натрия цеха жидкого хлора.

По данным [71] авария произошла из-за отключения электрооборудования

цехов хлорного производства, связанного с глубокой посадкой напряжения на секциях III – IV подстанции «Хлорная», которая была вызвана коротким замыканием.

В результате этого произошла утечка хлора через неплотно закрытую задвижку с линии нагнетания в линию всасывания компрессора, создав при этом избыточное давление в электролизерах и коммуникациях хлора. Это, в свою очередь, привело к выдавливанию воды из вакуумметров, гидрозатворов и санитарной колонны и выделению через них в атмосферу от 52 до 97 кг газообразного хлора.

В отделении хлористого водорода при остановке насосов орошения холодильников-абсорберов произошел выброс в атмосферу 40 – 81 кг хлористого водорода.

Также из-за остановки насоса на установке получения гипохлорита натрия в атмосферу было выброшено еще 12 – 20 кг хлора

Суммарно в атмосферу попало 64 – 117 кг хлора и 40 – 81 кг хлористого водорода.

Так как был северный ветер (примерно 1 – 2 м/с), образовавшееся газовое облако распространилось в сторону восточной проходной предприятия. В его зону попали работники предприятия, из которых у четверых наблюдалась легкая степень отравления хлором.

По заключению экспертной организации при указанной скорости ветра средняя глубина зоны химического заражения составила 889 – 1250 м [71].

Авария 11 мая 1976 г. в Хьюстоне (штат Техас, США)

По данным [16] авария произошла в результате автокатастрофы на горном шоссе. Автоцистерна с аммиаком, двигаясь по горной дороге, съехала с нее и упала на проезжую часть проходившего внизу шоссе. Мгновенно было выброшено 19 т аммиака. В начальный момент аварии облако смеси аммиака с воздухом было тяжелее окружающего воздуха и стелилось по земле. В районе аварии были отобраны пробы воздуха, но так как они были сделаны только через 2,5 ч после аварии, концентрация аммиака была уже очень низкой. В результате аварии погибло 6 человек и более 100 человек пострадали.

Авария 10 декабря 1976 г. в Батон-Руж (штат Луизиана, США)

В данном случае произошло разлитие хлора массой в 90 т. Он испарялся со скоростью 18 т/ч. Хотя авария и произошла вблизи крупного города, в результате катастрофы никто не пострадал, так как ветер дул в сторону реки Миссисипи, ширина которой около 1 км, и отнес облако на малонаселенную местность. В качестве

меры предосторожности 10 тысяч студентов и 500 человек местного населения были эвакуированы. Работникам, находившимся на предприятии, была оказана медицинская помощь.

Причиной утечки послужил относительно слабый взрыв смеси природного газа и воздуха. От ударной волны повредились поддерживающие опоры, из-за чего резервуар с хлором упал. При падении на землю в резервуаре образовалась пробоина. Размеры пробоины не указаны. Благодаря следующим условиям последствия от этой аварии были не столь велики, как могли бы быть: пробоина была не больших размеров, в связи с чем процесс утечки происходил медленно; ветер отнес облако низко малозаселенную местность; так как авария произошла в декабре, была низкая температура воздуха [16].

Авария при обращении с аммиаком 13 июля 1973 г. в городе Потчеструм (ЮАР)

Авария произошла на заводе по выпуску удобрений. На данный момент она является самой большой по числу погибших за всю историю аварий на объектах с аммиаком. Катастрофа произошла в результате отрыва торцевой части горизонтального цилиндрического резервуара со сжиженным аммиаком, который хранился под давлением при температуре 15° С. За очень короткий промежуток времени в горизонтальном направлении из резервуара было выброшено примерно 38 т аммиака.

В статье [67] сообщается, что в результате аварии погибло 18 человек. Все они получили сильное отравление аммиаком. Два человека погибло непосредственно на месте аварии, остальные спустя некоторое время.

Информации об метеоусловиях во время аварии практически нет. Известно только, что после аварии наблюдался небольшой ветер.

Высота выброса составила 20 м, а радиус облака на начальной стадии – 150 м. Пролива жидкой фазы не наблюдалось. Пострадавшие в аварии рассказывали, что дышать у земли было намного легче, так как воздух там содержал меньше аммиака [67].

Авария 31 января 1961 г. в Ла-Барре (штат Луизиана, США)

По информации из [16] авария произошла в результате железнодорожной катастрофы, вызванной сходом состава с рельс. В результате этого была разрушена цистерна, из которой вылилось не менее 35 т хлора. Зона поражения была оценена

в 15 км². Это было сделано на основании местоположения трупов домашних животных. Всего было найдено мертвыми 49 свиней, 4 мула, 2 коровы, 1 лошадь и 320 кур. Наиболее опасная зона, в которой наиболее быстро погибли животные, была расположена примерно в 2 км от места аварии по направлению ветра.

Через 3 часа концентрация хлора составляла 1200 мг/м³ в 75 м от места аварии и сохранялась такой еще 4 часа. Через 9 часов концентрация хлора заметно снизилась и составила 24 мг/м³. Это можно объяснить тем, что скорость испарения многотонного разлива хлора мала.

В результате аварии погиб один человек. Жертвой аварии стал 11-месячный ребенок, который находился в доме в 500 м от аварии. Отец, пытаясь спасти младенца, вынес его на улицу, тем самым усугубив ситуацию, так как концентрация хлора на улице была намного выше чем в доме. Другой ребенок, примерно такого же возраста, находился в доме до приезда спасателей и остался в живых. Всего же пострадало 100 человек, из которых 15 было отправлено в медпункт. У 10 человек, поступивших в госпиталь, наблюдался отек легких, 5 человек находилось в бессознательном состоянии [16].

Авария 24 декабря 1939 г. в Зарнешти (Румыния)

Утечка 24 т хлора произошла в результате разрыва оболочки резервуара под действием гидравлического давления. Погибло 60 человек, которые находились в основном в непосредственной близости к резервуару и на железнодорожной станции, находившейся в 250 м от места аварии. Это самая крупная авария с выбросом хлора по числу погибших. Также был поставлен еще 1 печальный рекорд: один из погибших находился в 800 м от места катастрофы – это наибольшее удаление от места аварии с выбросом хлора при летальном исходе для пострадавшего.

Ветер на момент аварии был не большой, и, соответственно, скорость распространения хлора была мала. Это дало время многим людям взобраться на возвышенности и таким образом избежать попадания в облако хлора [16].

Все основные данные по авариям с выбросом аммиака и хлора, которые были описаны выше, были обобщены, систематизированы и сведены в таблицу 1.5.

Таблица 1.5

Исходные данные и последствия имевших место аварий с выбросом опасных химических веществ

| Место аварии | Год | Тип аварии | ОХВ | Количество ОХВ | Метеорологические данные | Дополнительные данные по аварии | Последствия | | |
|---------------------------------------|------|--|-------------------------|---|---|--|---|----------------|---|
| | | | | | | | Зона | Погибшие, чел. | Пострадавшие, чел. |
| Горловка (Украина) | 2013 | Разгерметизация трубопровода жидкого аммиака | Аммиак | 600 кг | - | Диаметр трубопровода – 150 мм; давление – 12 атмосфер | - | 6 | 26 |
| Грэнитвилль (шт. Южная Каролина, США) | 2005 | Разрушение цистерны при столкновении двух поездов | Хлор | 82 т | Температура воздуха – 13° С; ветер дул с юго-юго-запада; скорость – 2-3 м/с | Длина отверстия – 90 см; ширина отверстия – 15 см; температура в цистерне – 3° С | По направлению ветра – 825 м; против ветра – 300 м; в боковом направлении – 330 м | 9 | 554 |
| Красный Яр (Омская обл., Россия) | 2003 | Разрушение отделителя жидкости в аккумуляторе холода | Аммиак | 300 кг | Ливень | Давление 0,5 Мпа | - | - | - |
| Новомосковск (Россия) | 2002 | Утечка газа через неплотно закрытую задвижку | Хлор, хлористый водород | 64-117 кг хлора; 40-81 кг хлористого водорода | Северный ветер; скорость ветра – 1-2 м/с | - | Глубина зоны – 889-1250 м | 0 | 4 |
| Хьюстон (шт. Техас, США) | 1976 | Разрушение цистерны в результате авткатастрофы | Аммиак | 19 т | - | - | - | 6 | Более 100 |
| Батон-Руж (шт. Луизиана, США) | 1976 | Пробоина в резервуаре с ОХВ | Хлор | 90 т | Низкая температура воздуха (декабрь) | Скорость испарения хлора 1,8 т/ч | - | 0 | Некоторым работникам предприятия была оказана мед. помощь |

| Место аварии | Год | Тип аварии | ОХВ | Количество ОХВ | Метеорологические данные | Дополнительные данные по аварии | Последствия | | |
|------------------------------|------|---|--------|----------------|--------------------------|---|---|----------------|--------------------|
| | | | | | | | Зона | Погибшие, чел. | Пострадавшие, чел. |
| Потчеструм (ЮАР) | 1973 | Крупное разрушение горизонтального цилиндрического резервуара, в результате отрыва торцевой части | Аммиак | 38 т | Небольшой ветер | Аммиак хранился под давлением, температура в резервуаре 15° С | Радиус облака в начальный момент 150 м; высота 20 м | 18 | - |
| Ла-Барре (шт. Луизиана, США) | 1961 | Пробитая цистерна с ОХВ (железнодорожная катастрофа) | Хлор | 35 т | - | Конц. хлора в 75 м от места аварии через 3 ч – 1200 мг/м ³ ; через 7 ч – 1200 мг/м ³ ; через 9 ч – 24 мг/м ³ ; | Площадь – 15 км ² | 1 | 100 |
| Зарнешт (Румыния) | 1939 | Разрыв оболочки резервуара под действием гидравлического давления | Хлор | 24 т | Небольшой ветер | - | Один из погибших на расстоянии 800 м | 60 | - |

1.4. Анализ отечественного и мирового опыта использования ячеечно-нейросетевого подхода и искусственных нейронных сетей при оценке последствий загрязнения воздуха

Нейросетевой подход при оценке последствий загрязнения воздуха представляет собой сравнительно новое и перспективное, но, тем не менее, уже хорошо зарекомендовавшее себя направление, альтернативное расчетным методикам. По мнению авторов [51], учет особенностей процесса загрязнения атмосферы во временных диапазонах оперативного прогнозирования и, соответственно, повышение точности прогноза могут быть достигнуты путем применения нейросетевых моделей прогнозирования, получивших широкое развитие в различных областях знаний.

Анализ публикаций в научных изданиях позволяет выделить следующие классы задач экологической безопасности, где нейросетевой подход уже применяется достаточно успешно:

- прогнозирование загрязнения воздуха аварийными и постоянно действующими источниками выбросов: оценка концентраций и размеров ЗЗ в динамике и при изменяющихся метеоусловиях;
- идентификация аварийных и постоянно действующих ИЗА по результатам измерений концентраций на станциях контроля.

В статье [11] проведен анализ архитектур, моделей и способов обучения ИНС, используемых для решения задачи прогнозирования качества атмосферного воздуха. Среди наиболее применяемых авторами называются нижеследующие:

- рекуррентные ИНС:
 - архитектуры с дополнительными входными переменными, сигналы от которых поступают не однократно, а последовательно в несколько моментов времени;
 - частично рекуррентные структуры и модели с контекстными входами (дополнительными входными переменными в скрытых слоях);
 - полностью замкнутые структуры, в которых все выходные сигналы подаются на входы нейронов первого слоя;
- модели с изменяющимися данными, предполагающие подбор наиболее подходящего для моделирования обучающего множества, обучение ИНС на этом множестве и практическое использование обученной сети для прогнозирования;

- последовательные нейросетевые конструкции. Они состоят из множества нейросетевых моделей, решающих локальные задачи по определению значений одной или нескольких переменных, которые затем используются в качестве входных переменных других нейросетевых моделей;
- самообучающиеся и самоорганизующиеся ИНС и карты, позволяющие определенным образом (в зависимости от алгоритма самообучения или самоорганизации) сгруппировать и обобщить отдельные примеры обучающего множества и представить сами примеры и их группы в виде одномерной или двумерной карты.

Все рассмотренные в работе [11] архитектуры и модели используются для оперативного и долгосрочного прогнозирования качества воздуха.

Рассмотрим несколько примеров использования ИНС для решения задач экологической безопасности.

В работе [12] разработана рекуррентная ИНС Элмана для прогнозирования концентрации SO_2 , наблюдаемой на трех участках мониторинга воздуха в Дели с использованием метеорологических данных. Входные параметры модели включали скорость ветра, температуру, относительную влажность и показатель направления ветра.

Исходные данные – результаты замеров концентрации диоксида серы на трех участках: индустриальном, коммерческом и жилом районах Дели (Индия), получаемые автоматизировано непрерывно в течение суток. Данные, наблюдаемые в течение периода, простирающегося с ноября до января, использовались как набор обучения, и данные за февраль использовались как контрольный набор.

Структура сети Элмана состояла из слоя входов, одного скрытого слоя с обратной связью и выходного слоя. Звенья обратной связи (рекуррентные звенья) задавались от скрытых нейронов к фиктивным входным нейронам, специально созданным для каждого рекуррентного звена. Обратные связи делают сети Элмана полезными в таких областях, как обработка сигнала и прогнозирование, где временное измерение играет важную роль. Они хранят набор образцов, и когда подобные образцы появляются, они связывают вход с самым близким сохраненным образцом.

Для обучения сети использовался алгоритм Левенберга-Марквардта. Обучение было продолжено до тех пор, пока остаточная среднеквадратическая ошибка (среднеквадратическая погрешность) не достигла значения 0,1.

При сравнении результатов, полученных в ходе данного исследования, с дан-

ными, полученными с использованием многомерных моделей, замечено, что отклик ИНС на прогнозирующие данные лучше соответствует реальному процессу, чем отклик регрессионных моделей.

Схожая задача для такого же вещества решалась авторами статьи [13]. Однако в качестве нейросетевой архитектуры ими была выбрана двухслойная ИНС прямого распространения. Обучающая выборка была составлена на основе данных, полученных на метеорологической станции и станции по контролю загрязнения города Стамбула (Турция).

Рассматривались нейросетевые модели, включающие 10 входных переменных (предыдущая концентрация диоксида серы, давление, температура, влажность, скорость и направление ветра, время суток, уровень инсоляции, облачность, наличие осадков), от 18 до 30 скрытых нейронов и одну выходную переменную, соответствующую прогнозируемой концентрации.

Полученные результаты сопоставлялись с результатами прогнозирования концентрации диоксида серы по имевшимся и использовавшимся ранее нелинейным регрессионным моделям. Авторами работы [13] сделан вывод о гораздо более точном соответствии фактическим измерениям результатов нейросетевого моделирования по сравнению с результатами расчетов по нелинейным регрессионным моделям.

В работе [72] авторами поставлены и решены следующие задачи:

- разработаны нейросетевые модели прогнозирования загрязнения атмосферного воздуха постоянно действующими источниками (на заданное время) по результатам замеров, полученным на станциях контроля сети наземных наблюдений;
- разработаны нейросетевые модели прогнозирования загрязнения атмосферного воздуха в случае аварийных выбросов (на основе результатов вычислительных экспериментов).

Нейросетевая модель оперативного прогнозирования на последующий момент времени представляла собой двухслойную ИНС, в качестве входных переменных которой использовались значения концентраций ЗВ, полученные в ряде дискретных моментов времени. В качестве выходного значения ИНС использовалось прогнозируемое значение концентрации на последующий момент времени. Принималось допущение, что в течение прогнозируемого интервала времени (от 0,5 до нескольких часов) значения метеопараметров не изменяются.

С использованием нейросетевого подхода авторами работы [72] также решались две задачи:

- получение профиля концентрации ЗВ в ЗЗ;
- получение геометрических характеристик мгновенной ЗЗ, образующейся в результате аварийного выброса ОХВ.

Показана высокая корреляция результатов расчетов по разработанным авторами моделям с результатами вычисления по стандартным расчетным методикам и данными экспериментальных наблюдений, причем во втором случае нейросетевая модель позволила получить характеристики ЗЗ без знания параметров реального источника выброса.

В статье [73] особое внимание уделено прогнозированию последствий аварийных выбросов при изменяющихся метеоусловиях. Данная постановка осложняется необходимостью иметь сценарий изменения метеоусловий, который учитывается при расчетах по нейросетевым моделям. Такой сценарий может задаваться вручную либо рассчитываться по специальным моделям, например, по тем же ИНС. В работе [73] решены две задачи:

- прогнозирование метеоусловий на заданный интервал времени;
- прогнозирование значения максимальной концентрации, длины и ширины ЗЗ в результате аварий на заданный интервал времени при изменяющихся метеоусловиях, полученных при решении первой задачи.

В работе [73] представлены обобщенные модели для прогнозирования изменения различных метеоусловий: скорости и направления ветра, облачности, относительной влажности и атмосферного давления, учитываемых традиционно при расчетах загрязнения с помощью специальных методик. В зависимости от структуры нейросетевой модели состав входных переменных варьируется и представляет собой вектор метеоусловий в один или несколько предыдущих моментов времени. Для моделирования использовались однослойные (от 8 до 20 нейронов в слое) и двухслойные (до 8 нейронов в каждом слое) ИНС прямого распространения.

Удовлетворительные результаты прогнозирования скорости ветра позволили использовать их для оценки характеристик ЗЗ и максимальной концентрации ЗВ при решении второй задачи. Здесь максимальная концентрация прогнозировалась по отдельным нейросетевым моделям (при этом на вход подавалась аналогичная концентрация в предшествующие моменты времени и вектор скоростей ветра) и в общих моделях с характеристиками ЗЗ, где она также была задействована в качестве входных переменных при расчете длины, ширины, площади и угла ЗЗ. Такой комплекс ИНС позволил достичь очень низких значений ошибки прогнозирования, что подтвердило эффективность ИНС для решения поставленной задачи.

В отличие от предыдущей статьи, в работе [74] приведен пример прогнозирования характеристик и построения ЗЗ одновременно при изменяющихся скорости и направлении ветра. Приведенный пример продемонстрировал, что изменяющиеся метеоусловия влияют не только на геометрические характеристики зоны и концентрацию ЗВ в ней, но и на ее месторасположение. Таким образом, появляется возможность не только принимать более взвешенные и правильные решения по ликвидации последствий химических аварий, но и верно выбирать объекты, к которым эти решения применяются.

Задача идентификации ИЗА является одной из наиболее сложных задач экологической безопасности. Она может быть решена сведением к задачам оптимизации или распознавания образов. И всегда один из самых главных вопросов при этом – точность идентификации, определение степени уверенности в то, что идентифицированный источник или группа источников являются истинными загрязнителями воздуха. Один из самых точных подходов – нейросетевой. При этом могут использоваться различные классы и архитектуры ИНС.

Так, в статье [75] предложены два способа нейросетевой идентификации организованных постоянно действующих ИЗА, основанных на использовании двухслойных ИНС прямого распространения. В первом способе идентификация осуществляется косвенным образом за счет расчета расстояния до наиболее вероятного ИЗА. Рассчитанное расстояние сравнивается с известным местоположением каждого источника и определяется один или несколько наиболее вероятных виновников ухудшения экологической обстановки.

Второй способ предусматривает сведение задачи идентификации к задаче классификации образов. ИНС обучается формировать выходной вектор виновности ИЗА. Значения выходов, близкие к единице говорят о высокой вероятности виновности.

Оба способа предусматривают ввод исходной информации о концентрациях различных ЗВ, полученных на станции контроля и действующие метеорологические характеристики. Обучение ИНС проводилось на примерах, полученных для различных уровней превышения предельно допустимых выбросов и комбинаций метеоусловий. Анализ полученных результатов позволил авторам сделать вывод о высокой эффективности нейросетевого подхода для решения задачи идентификации постоянно действующих ИЗА.

В статье [72] двухслойные ИНС прямого распространения предлагается использовать и для решения задачи идентификации аварийных ИЗА. В ней предло-

жены различные постановки, учитывающие исходную информацию с одной и нескольких станций контроля в один или несколько моментов времени после аварийного выброса.

Все задачи сводились к классификации образов на основе вектора виновности. Обучение ИНС проводилось для различных объемов выбросов при большом количестве комбинаций метеоусловий. Тестирование ИНС показало стопроцентный уровень распознавания истинных виновников аварии.

В работе [76] предлагается способ решения задачи идентификации как задачи кластеризации на основе самообучающихся ИНС Кохонена, представляющих собой однослойные сети прямого распространения. Количество входных сигналов таких сетей соответствует количеству уникальных признаков, характеризующих объект исследования, по которым ведется отнесение примеров к отдельным кластерам. Количество выходных сигналов сети (нейронов) соответствует максимально возможному количеству единичных кластеров.

В процессе отнесения примеров обучающей выборки к одному из кластеров совокупность входных сигналов сравнивается с весовыми коэффициентами нейрона, вследствие чего определяется нейрон, в наибольшей степени соответствующий входному вектору. Веса данного нейрона корректируются в сторону входного вектора. В зависимости от выбранного алгоритма самообучения корректировке могут также подвергаться весовые коэффициенты либо только наиболее близкого входному вектору нейрона, либо еще и нейроны-соседи. В процессе предъявления всего множества обучающих примеров для каждого из них нейрон соответствия может меняться.

Таким образом, процедура закрепления примеров за кластерами проводится после окончания процесса обучения, наступающего при стабилизации весовых коэффициентов.

Задача идентификации в работе [76] решалась в отношении постоянно действующих источников загрязнения, для которых характерны многокомпонентные выбросы, что дало возможность использования множества характеристик (концентраций ЗВ) для распределения обучающих примеров по кластерам. Каждый пример – это вектор концентраций ЗВ, зафиксированных при различных метеорологических условиях и при наличии различного уровня кратности превышения норм предельно допустимых выбросов на одном из источников, расположенных на подконтрольной территории. В зависимости от постановки решалась задача идентификации по замерам одной, двух или более станций контроля.

Рассмотренные в работе [76] примеры показали возможность эффективного

использования ИНС Кохонена для решения задачи идентификации постоянно действующих ИЗА. При этом проведенный анализ и сравнение с другими методами идентификации показали, что в случае правильного выбора структуры сети идентифицирующая способность зачастую оказывалась выше.

В трудах [77] эти выводы подтверждены результатами идентификации с использованием карт Кохонена, позволяющих визуализировать распределение отдельных примеров по кластерам. Было рассмотрено распределение 225 обучающих и 55 тестовых примеров по кластерам на картах разного размера: 4×4 , 7×7 и 10×10 . Анализ результатов показал, что при использовании карт больших размеров некоторые кластеры оказываются незадействованными, а многие содержат настолько мало примеров, что говорить об обобщении информации в процессе кластерного анализа не приходится, по сути, эта информация частного характера. При использовании карт малых размеров, наоборот, в каждый кластер попадает слишком большое количество примеров, и происходит такое усреднение информации, что примеры, попадающие в кластер, но находящиеся достаточно далеко от его центра, зачастую имеют признаки, не соответствующие описанию кластера.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о перспективности и эффективности использования нейросетевого подхода для решения задач анализа последствий аварийного загрязнения воздуха промышленными источниками.

Одно из направлений развития нейросетевого подхода при оценке воздействия ЗВ на атмосферный воздух – ЯНМ. Они представляют собой синтез нейросетевых моделей, основанных на классических архитектурах, ячеечных моделей и клеточных автоматов.

В основе ячеечных моделей лежит представление об идеальном перемешивании в пределах ячеек, расположенных последовательно, и отсутствии перемешивания между ячейками. Классические ячеечные модели могут описывать процесс однонаправленного движения среды, а также предусматривают возможность обратного потока между ячейками.

Клеточный автомат представляют собой дискретные динамические системы, поведение которых полностью определяется в терминах локальных зависимостей. При использовании клеточного автомата пространство разделено равномерной сеткой, каждая клетка которой содержит определенный объем информации. Любая клетка приобретает новое состояние на каждом дискретном шаге времени за счет правил, которые определяются состояниями ее близких соседей на предыдущем временном шаге, причем правила клеточного автомата являются локальными и повсюду одинаковыми.

Согласно [52] в ЯНМ аналогично классическим ячеечным моделям все пространство среды разбивается на одинаковые ячейки, внутри которых она имеет фиксированные значения характеристик и свойств, однако при переходе от одной ячейки к другой эти значения меняются. При этом, в отличие от классических ячеечных моделей, может быть смоделировано изменение состояния среды в дискретные моменты времени в ячейках, расположенных на плоскости и в трехмерном пространстве, с различной формой и порядком расположения, как в клеточном автомате. В то же время, для каждой ячейки могут иметь место не два или несколько, а бесконечное множество состояний, определяющихся состоянием (характеристиками и свойствами) среды. Возможность оперировать различными состояниями достигается за счет описания их изменения во времени и пространстве при помощи аппарата ИНС.

В работе [52] сформулирована общая постановка задачи ячеечно-нейросетевого моделирования. В качестве объекта исследования рассмотрена однородная среда, характеризующаяся различными физическими параметрами. В общем случае эти параметры меняются во времени и в пространстве, что обусловлено внутренними и внешними условиями ее существования. Требуется разработать модель, позволяющую наилучшим образом описать состояние среды в любой ее точке в любой момент времени.

В соответствии с концепцией, заложенной в ячеечные модели, исследуемая среда должна быть разделена на одинаковые по размеру и форме ячейки. Состояние среды в любой точке одной ячейки в один и тот же момент времени одинаково. Состояния в различных ячейках в один и тот же момент времени в общем случае различаются. Изменение состояния среды зависит от движущих сил, обусловленных градиентом концентрации, температуры или других физико-химических характеристик, а также от случайных внешних воздействий (возмущений), не связанных с состоянием самой среды.

В качестве входных переменных ЯНМ могут использоваться известные состояния ячеек, внешние условия, а также различные другие характеристики, непосредственно влияющие на процесс. Выходными переменными модели являются состояния тех же самых ячеек, а также, возможно, состояния соседних ячеек в более поздний момент времени.

В [78] отмечается, что ЯНМ могут быть использованы в качестве альтернативы существующим моделям рассеяния примеси в атмосфере, которые используются в ряде расчетных методик, или в дополнение к ним при оценке загрязнения атмосферы. Так, с их помощью могут решаться задачи ОВОС аварийных выбросов

большой массы вещества при постоянных или переменных метеоусловиях, а также задачи ОВОС организованными постоянно действующими ИЗА при переменных метеоусловиях.

Предложен подход, связанный с совместным использованием традиционных расчетных методик и ЯНМ, заключающийся в том, что обучающие выборки ИНС могут быть получены на основе расчетных методик для постоянных метеоусловий, а обученные сети на практике будут использованы для различных других исходных данных, как при постоянных, так и при переменных метеоусловиях. Возможность связать воедино расчет выходной концентрации при постоянных и переменных метеоусловиях одной и той же сетью появляется, благодаря присущему всем ИНС свойству обобщения.

Проведенный анализ научных публикаций по использованию ЯНМ для решения задач экологической безопасности показал, что данный подход еще недостаточно развит не только в нашей стране, но и за рубежом.

Результаты последних разработок опубликованы в статье [79]. Здесь предложены ЯНМ прогнозирования среднесуточных концентраций диоксида серы и взвешенных веществ в атмосферном воздухе. Обучающие данные по выборкам за 2002 – 2003 гг. были получены с двух станций контроля города Стамбула (Турция). Полученные концентрации сравнивались с результатами расчетов по моделям множественной линейной регрессии. Авторами работы [79] сделан вывод о более высокой корреляции между фактически наблюдавшимися концентрациями и полученными с помощью ЯНМ для всех загрязнителей, в отличие от случая, когда использовались регрессионные соотношения. Кроме того, отмечается, что качество прогнозирования загрязнения диоксидом серы в целом лучше, чем качество прогнозирования загрязнения взвешенными веществами, а результаты прогнозирования в зимний период более точны, чем в летний.

Также немного ранее были опубликованы результаты моделирования изменения среднесуточной концентрации озона в атмосфере на основе ЯНМ с многослойной структурой ИНС, обученной с помощью генетического алгоритма [80]. Результаты моделирования признаны авторами удовлетворительными, а метод ячеечно-нейросетевого моделирования обозначен как один из возможных для решения задачи прогнозирования загрязнения воздуха озоном.

1.5. Исследование современного опыта разработок информационных систем для анализа последствий аварийного загрязнения атмосферы промышленными источниками

Отечественные коммерческие разработки

Комплексный обзор отечественных разработок для оценки последствий химических аварий приведен в книге [5]. Среди них выделяются программные средства научно-производственного предприятия «Логус», фирмы «Интеграл», ОАО НТЦ «Промышленная безопасность».

Программа «Облако» НПП «Логус» предназначена для оценки токсического воздействия атмосферных выбросов СДЯВ в результате аварий на ХОО. Программа используется при разработке материалов по ОВОС в результате хозяйственной деятельности. Данная программная разработка интегрируется с другими разработками НПП «Логус», использует общие с ними БД.

Фирма «Интеграл» является разработчиком программы для прогнозирования последствий аварийных выбросов СДЯВ ППА. Она предназначена для долговременного и оперативного прогнозирования последствий химических аварий с атмосферным выбросом веществ в газообразном или аэрозольном состоянии на основе методики [81]. Для аварии с известными условиями можно получить характеристики ЗЗ, рассчитать время подхода облака к определенным объектам при постоянных метеоусловиях, наблюдавшихся в момент аварии. Программа также может использоваться при проектировании и реконструкции отдельных производств. Результаты работы программы представляются в виде текстового отчета и карты с изображением зоны химического заражения.

Открытое акционерное общество «Научно-технический центр по безопасности в промышленности» (ОАО НТЦ «Промышленная безопасность») разработало серию программных средств ТОКСИ+ на основе методик [64, 82]. Они позволяют проводить расчеты ЗЗ, оценивать концентрации ЗВ во времени и в пространстве, определять токсодозы, полученные людьми, в результате аварийных выбросов ОХВ по различным сценариям развития аварии. Программа имеет БД по свойствам ОХВ, позволяет отображать результаты расчетов на картах и ситуационных планах, экспортировать результаты своей работы в форматы документов Microsoft Word и таблиц Microsoft Excel.

Зарубежные коммерческие разработки

Помимо отечественных разработок в области экологической безопасности и,

конкретно, ОВОС химических аварий можно выделить ряд зарубежных разработок. Их обзор дан в работе [83].

Компания Det Norske Veritas разработала программный комплекс Phast, предназначенный для решения широкого круга задач ОВОС аварий на типовом оборудовании (емкостном и трубопроводном) с газообразными и жидкими ОХВ и в производственных помещениях. Результаты моделирования последствий аварий с помощью комплекса Phast представляются в виде зависимостей концентрации ЗВ во времени и на расстоянии, оценок токсодоз, ЗЗ, вероятностей поражения в результате реализации различных сценариев развития аварии. Моделирование последствий выброса ОХВ внутри производственного помещения реализуется по сценариям со внутренним (только внутри помещения) или внешним (с попаданием части ЗВ за пределы помещения) выбросом.

Американским институтом нефти (American Petroleum Institute, API) разработано ПО Risk-Based Inspection, позволяющее среди прочего моделировать уровни токсического воздействия и загрязнения ОС в результате аварий на химическом заводе. Отличительная черта данной разработки – специальный учет особенностей технологического оборудования: сосудов, емкостей, аппаратов, работающих под давлением, трубопроводов.

Американская компания Shell является разработчиком программного комплекса FRED, предназначенного для моделирования последствий пожара, взрыва и рассеяния углеводородов с учетом различных возможных сценариев. Результаты моделирования представляются в виде отчета и изображений на карте местности.

Кроме того, в обзоре [83] приводится описание и ряда других иностранных разработок в области экологической безопасности. Сравнивая отечественные и зарубежные программные средства, авторы [83] отмечают среди прочего их высокую стоимость не только для организаций, занимающихся обучением или исследованиями в данной области, но и непосредственно для промышленных предприятий. Кроме того, методическая основа данных разработок не раскрывается, что зачастую приводит к неверной интерпретации получаемых результатов.

Учебно- и научно-исследовательские разработки

ИС и программные средства в области экологической безопасности, предназначенные для использования предприятиями и экологическими службами, как правило, дороги для учебных заведений. Поэтому ряд аналогичных разработанных систем имеет непосредственно образовательное или научно-исследовательское

назначение. Так, в статье [84] представлен учебный программный модуль для расчета концентраций вредных веществ в атмосферном воздухе, образующихся в результате выбросов предприятий, использующий за основу своего математического обеспечения методику [43].

Функциональные возможности, обуславливающие ориентацию программы для решения учебных и научно-исследовательских задач, перечислены ниже:

- ввод, сохранение и использование ранее сохраненных исходных данных для проведения вычислений, анализа и исследований;
- одновременный расчет всех зависимостей и их вывод на тематических страницах с закладками в графическом виде;
- формирование текстового отчета с результатами расчета и анализа;
- возможность исследования влияния различных параметров ИЗА и метеоусловий на характер рассеяния вредной примеси в атмосферном воздухе;
- графическая визуализация следующих зависимостей:
 - концентрации от расстояния до ИЗА вдоль оси направления ветра при постоянной скорости ветра;
 - концентрации от расстояния поперек оси направления ветра при постоянной скорости ветра;
 - концентрации от расстояния до поверхности земли при постоянной скорости ветра;
 - максимальной концентрации от расстояния до ИЗА вдоль оси направления ветра;
 - максимальной концентрации от скорости ветра;
 - расстояния, на котором наблюдается максимальная концентрация, от скорости ветра;
 - опасной скорости ветра от расстояния до ИЗА вдоль оси направления ветра.

При выполнении учебно-исследовательских расчетов программный модуль позволяет провести анализ влияния метеоусловий и характеристик источника выброса на процессы распространения примеси. Кроме того, авторы статьи [84] отмечают широкое использование данного модуля в учебном процессе, например, при проведении лабораторных практикумов по экологической безопасности и связанным с ней направлениям.

Большой объем исследований с использованием разработанной информации

онно-моделирующей системы для анализа и оценки последствий аварий на химических предприятиях выполнен в диссертации [85]. За основу методического обеспечения в системе использована «Методика оценки последствий химических аварий (ТОКСИ)». Проведена оценка последствий химических аварий (концентраций ЗВ и размеров ЗЗ) в зависимости от различных внешних (метеорологических условий, времени суток, характеристик местности) и внутренних (тип ИЗА, количество ЗВ) факторов.

В работе [85] отмечается возможность использования информационно-моделирующей системы и результатов ее работы не только для прогнозирования фактических и возможных последствий аварийных выбросов, но и для идентификации их источников. Кроме того, данная система также используется в учебном процессе для выполнения лабораторных, курсовых и дипломных работ студентами, обучающимися по программам подготовки дипломированных специалистов высшего профессионального образования.

Ряд программных разработок, реализующих ИНС и ориентированные на решение задач экологической безопасности, был выполнен на кафедре компьютерно-интегрированных систем в химической технологии Российского химико-технологического университета им. Д. И. Менделеева.

В статье [86] представлена интеллектуальная ИС нейросетевого моделирования на основе генетического алгоритма обучения, ее функциональная структура и структура БД. Данная система выполняет следующие функции:

- создание нейросетевых моделей различной архитектуры;
- обучение нейросетевых моделей с использованием генетического алгоритма;
- расчет по обученным нейросетевым моделям;
- сравнение нейросетевых моделей различной архитектуры;
- анализ эффективности и корректности обучения нейросетевых моделей различной архитектуры;
- анализ корректности данных для обучения нейросетевых моделей.

ИС построена по модульному принципу и включает ряд подсистем, реализующих отдельные функции системы. Для эффективного хранения, управления и обработки больших объемов данных используется БД, содержащая информацию о нейросетевых моделях, настройках ИНС, выборках данных и синаптических коэффициентах обученных сетей. Кроме того, в БД хранятся настройки генетического алгоритма и генетических операторов, применяемых для обучения ИНС.

В [86] продемонстрирована работа и представлены результаты использования ИС для оценки последствий аварийного выброса аммиака. Получены профили максимальной концентрации аммиака в облаке ЗВ во времени после аварии. Аналогичные профили были получены на основе расчетной методики [64] и с использованием многофункционального инструмента для разработки, реализации, визуализации и моделирования ИНС Matlab Neural Network Toolbox. Показано, что данная ИС дает результаты оценки экологических последствий химических аварий, сопоставимые, как с результатами расчета по стандартным методикам, так и с результатами, полученными с помощью специальных программных средств нейросетевого моделирования. В то же время ее преимущество в том, что она непосредственно ориентирована на решение задач экологической безопасности и позволяет получить результаты в дискретные моменты времени. Это, в свою очередь, дает возможность моделировать при изменяющихся метеоусловиях, тогда как стандартные расчетные методики работают на основе допущения о постоянстве метеоусловий и других внешних факторов до полного рассеяния примеси ЗВ.

В статье [87] приведены другие примеры нейросетевых моделей для задач экологической безопасности, реализованных и исследованных с помощью программных средств нейросетевого моделирования, в том числе и ИС, описанной в [87].

Основное внимание в работе [87] уделяется работе системы при прогнозировании размеров ЗЗ (длины и ширины) и максимальной концентрации ЗВ в ней в заданный момент времени. При работе программ нейросетевого моделирования использовалась модель, содержащая четыре входные переменные: скорость ветра, длину и ширину ЗЗ, максимальную концентрацию в ней в предшествующий момент времени. Отдельный учет скорости ветра в качестве независимой переменной позволил задать сценарий ее изменения как одной из метеорологических характеристик.

В приведенных в [87] примерах работы программных средств нейросетевого моделирования показано, что уменьшение средней скорости ветра в процессе длительного рассеяния примеси приводит к тому, что облако ЗВ будет существовать и подвергаться опасным последствиям своего воздействия значительно более длительное время, чем это прогнозируется по расчетной методике [64]. Из этого авторами делается вывод, что учет изменчивости метеоусловий в прогнозе негативных последствий аварийных выбросов крайне желателен и разрабатываемые программные средства должны обладать такой функциональной возможностью.

Также в [87] подтверждены ранее сделанные выводы о соответствии друг

другу результатов прогнозирования по нейросетевым моделям и моделям расчетных методик, полученных с помощью различных программных средств.

Сравнение результатов моделирования для различных информационных систем с последствиями реальных аварий

В статьях [67, 68] приводится сравнительный анализ результатов моделирования последствий реально имевших место химических аварий с помощью программных комплексов ТОКСИ+ и PHAST. В [67] отмечается, что использование данных с описанием аварий для верификации методик затрудняется тем, что, в отличие от экспериментов, данные об авариях отличаются более высокой степенью неопределенности информации об условиях их развития (метеоусловия, размер отверстия, масса выброса), особенно если авария сопровождалась взрывом. В этой связи важно учитывать такие факторы, как масштаб времени и достоверность имеющихся об аварии данных.

В [67, 68] проанализированы последствия следующих аварий:

1. 13.07.1973, ЮАР, Потчеструм, завод по производству удобрений. За всю историю аварий на объектах с аммиаком данная авария имела наиболее тяжелые последствия – 18 погибших. Характеристика аварии: мгновенное разрушение горизонтального цилиндрического резервуара с 38 т сжиженного аммиака, хранившегося под давлением при температуре 15 °С. Известно, что на месте аварии не наблюдалось пролива жидкой фазы. Метеоусловия: скорость ветра 0,5 – 1 м/с, класс устойчивости атмосферы F [67].

2. 06.01.2005, США, Южная Каролина, Грэнитвилль, столкновение поездов на железной дороге. В результате произошла разгерметизация цистерны, содержащей 82 т сжиженного хлора. Размер отверстия примерно 90×15 см. Погибли 9 человек, за медицинской помощью обратились 554 человека. В районе аварии были обнаружены трупы животных и рыб. Согласно результатам расследования, все погибшие находились в облаке хлора около 10 мин (время экспозиции). По сообщениям очевидцев, ЗВ было распределено на 825 м вдоль оси ветра, на 300 м в противоположную сторону и на 330 м в поперечном направлении. Метеоусловия: температура воздуха 13 °С, юго-юго-западный ветер, скорость ветра 1 – 2 м/с, класс устойчивости атмосферы F [67, 68].

3. 09.12.1970, США, Миссури, Порт-Хадсон, разрыв трубопровода с жидким пропаном. Погибших не было, пострадали 10 человек. Диаметр трубопровода 200 мм. Давление в трубопроводе – 6 МПа, температура вещества 1 °С. В течение 24 мин с момента разрушения трубопровода до взрыва было выброшено не менее

60 т пропана. Скорость ветра 2,4 м/с. Температура ОС 1 °С. Класс устойчивости атмосферы F. Тип подстилающей поверхности – ровная с отдельно стоящими деревьями. Взрыв произошел в результате искрового разряда в термостате холодильной установки, находившейся в 300 м от места выброса [67].

Результаты моделирования последствий аварии в Потчеструме (ЮАР) были получены по методикам [64, 82] с помощью программного комплекса ТОКСИ+ [67]. Установлено, что результаты, полученные по этим методикам, различаются, причем в значительно большей степени они согласуются с фактическими последствиями аварии для методики [82]. Это объясняется тем, что методика [64] ориентирована на расчет последствий выброса «легкого» газа, а имевший место выброс аммиака при описанных условиях хранения, относится к категории выбросов «тяжелого» газа, сопровождающихся гравитационным растеканием более плотной, чем воздух, аммиачно-воздушной смеси, включающей жидкие микрокапли аммиака. В результате моделирования по методике [82] получены размеры зон смертельного поражения: 329 м – в направлении ветра, 149 м – против ветра, 343 м – максимальная ширина.

В работе [67] проведены исследования по влиянию класса устойчивости атмосферы, скорости ветра и времени экспозиции на размеры зон смертельного и порогового поражения. Показано, что во всех направлениях при неустойчивой стратификации атмосферы зоны поражения оказываются меньше. Увеличение времени экспозиции приводит к увеличению размеров зон поражения. Повышение скорости ветра сопровождается существенным уменьшением размеров зон поражения для любых классов устойчивости атмосферы.

Результаты моделирования последствий аварии в Грэнтвилле (США) также были получены по методикам [64, 82] с помощью программного комплекса ТОКСИ+ [67]. Получил подтверждение вывод из предыдущего примера, что размеры зон поражения определяются точнее при расчете по методикам, учитывающим силу тяжести. Полученные результаты сравнительного анализа с фактически имевшими место последствиями аварии позволили авторам [67] сделать вывод об удовлетворительном соответствии с учетом имевшей место неопределенности исходной информации.

В статье [68] приведены данные расчета зон вероятностей 50 % и 90 % смертельного поражения людей при скоростях ветра 1 и 2 м/с для класса устойчивости атмосферы F с помощью программных комплексов ТОКСИ+ и PHAST. Результаты моделирования представлены в таблице 1.6.

Размеры зон вероятностей 50 % и 90 % смертельного поражения людей для аварии в Грэнтвилле (США)

| Программный комплекс | Длина зоны поражения, м | | Максимальная ширина зоны поражения, м | |
|--|-------------------------|-------|---------------------------------------|-------|
| | 1 м/с | 2 м/с | 1 м/с | 2 м/с |
| Вероятность смертельного поражения 90 % | | | | |
| PHAST | 1398 | 834 | 785 | 596 |
| ТОКСИ+ | 987 | 671 | 588 | 557 |
| Вероятность смертельного поражения 50 % | | | | |
| PHAST | 1645 | 898 | 986 | 820 |
| ТОКСИ+ | 1242 | 770 | 652 | 730 |

Из приведенных в таблице результатов видно, что программный комплекс PHAST рассчитывает большие размеры зон поражения, чем комплекс ТОКСИ+. Тем не менее, авторы статьи [68] делают вывод об удовлетворительном согласии результатов, полученных для программного комплекса PHAST, и подтверждают аналогичные выводы, сделанные в работе [67].

Моделирование последствий аварии в Порт-Хадсоне (США) проводилось с использованием программного комплекса ТОКСИ+ [67]. Отличительной особенностью этой аварии от двух предыдущих примеров является характер ее негативных последствий: вместо токсического воздействия распространение облака пожаро- и взрывоопасного вещества. Тем не менее, методика [82], использованная для расчетов, подходит и для этого случая с той лишь разницей, что оценке подлежали зоны взрывоопасных концентраций. Расчет зон концентрационных пределов воспламенения (нижнего (361 м) и верхнего (151 м)) показал, что источник инициирования взрыва попадает в опасный диапазон. С оговоркой об ограниченности сведений о последствиях данной аварии авторы [67] делают вывод о корректности полученных результатов моделирования.

1.6. Выводы

Проведенные исследования и систематизация научно-технической информации в области решения задач экологической и промышленной безопасности позволяют сделать следующие обоснованные выводы:

1. Проблема решения задач экологической и промышленной безопасности сохраняет свою актуальность в связи с ростом объемов производства и потребления продукции, требующей на различных стадиях своего жизненного цикла использования ОХВ.
2. Эффективный контроль и принятие решений в ЧС техногенного происхождения, связанных с выбросом ОХВ, могут и должны быть обеспечены современной научно-методической и программно-алгоритмической базой. Один из наиболее эффективных и перспективных методических подходов к решению задач экологической и промышленной безопасности – применение методов ИИ.
3. Метод ячеечно-нейросетевого моделирования обладает преимуществами и имеет ряд особенностей, позволяющих успешно решать с его помощью задачи моделирования рассеяния ЗВ в атмосфере не только в условиях стационарности метеорологических характеристик и других параметров ОС, но и в условиях их изменчивости или неопределенности.
4. Метод ячеечно-нейросетевого моделирования должен применяться не в качестве замены традиционным моделям, методам и методикам, а в качестве дополнения к ним, позволяя существенно расширить функциональные возможности соответствующей программно-инструментальной базы с сохранением необходимой точности решения расчетных задач.
5. Использование математически сложных методов ИИ требует разработки соответствующего информационного и программно-алгоритмического обеспечения – компьютерных информационно-моделирующих систем, ориентированных на предметную область и специфику решаемых задач. В качестве одной из таких систем выступает представленная в настоящей диссертационной работе ИС «ЯНСКА».

Глава 2. Разработка ячеечно-нейросетевых моделей и специальных алгоритмов системного анализа последствий аварийного загрязнения атмосферы промышленными источниками

2.1. Методология системного подхода к анализу последствий аварийного загрязнения атмосферы промышленными источниками

Перед разработкой специализированной ИС «ЯНСКА», одной из первых целей, поставленных в рамках данной диссертационной работы, стала изучение, осмысление и анализ предметной области, задач и методов их решения. Это необходимо для создания качественной ИС в любой предметной области, так как она сильно влияет на многие аспекты проекта, такие как модель хранения данных, требования к ИС, пользовательский интерфейс и другие.

Для достижения поставленной цели использовались методы СА. Центральным понятием СА является понятие системы, то есть совокупности взаимодействующих элементов, объединенных единством цели или общими целенаправленными правилами взаимоотношений. Любая система состоит из взаимодействующих между собой, а также с ОС, элементов. Связи между этими элементами образуют структуру системы. В свою очередь, если имеются связи между системами, то в совокупности они образуют сложную систему [5, 88].

Системный анализ – это стратегия изучения сложных систем. В основе СА лежит декомпозиция сложных систем, то есть их разделение на более простые подсистемы. Стратегия изучения сложной системы строится по следующим принципам: формулировка цели исследования; постановка задачи по реализации этой цели и определение критериев эффективности решения задачи; разработка плана исследования; последовательное продвижение по всем этапам и возможным направлениям и тому подобное [5].

Структура СА базируется на следующих трех составляющих: методологии, теории и методах СА (рис. 2.1) [89].

Методология СА основывается на системном подходе, математическом аппарате и некоторых других аспектах.

Составляющими теории СА являются: понятия (понятийный аппарат), теория систем, СА, принятия решений и другие. Например, теория систем основывается на системе знаний, которая может объяснить происхождение, устройство, функционирование и развитие системы той или иной природы. В свою очередь,

теория принятия решений оперирует такими понятиями как экспертные оценки, лицо, принимающее решение (ЛПР), альтернативные решения и тому подобными. Процесс принятия решения направлен на разрешение какой-либо проблемной ситуации оптимальным путем с учетом всех возможных факторов.

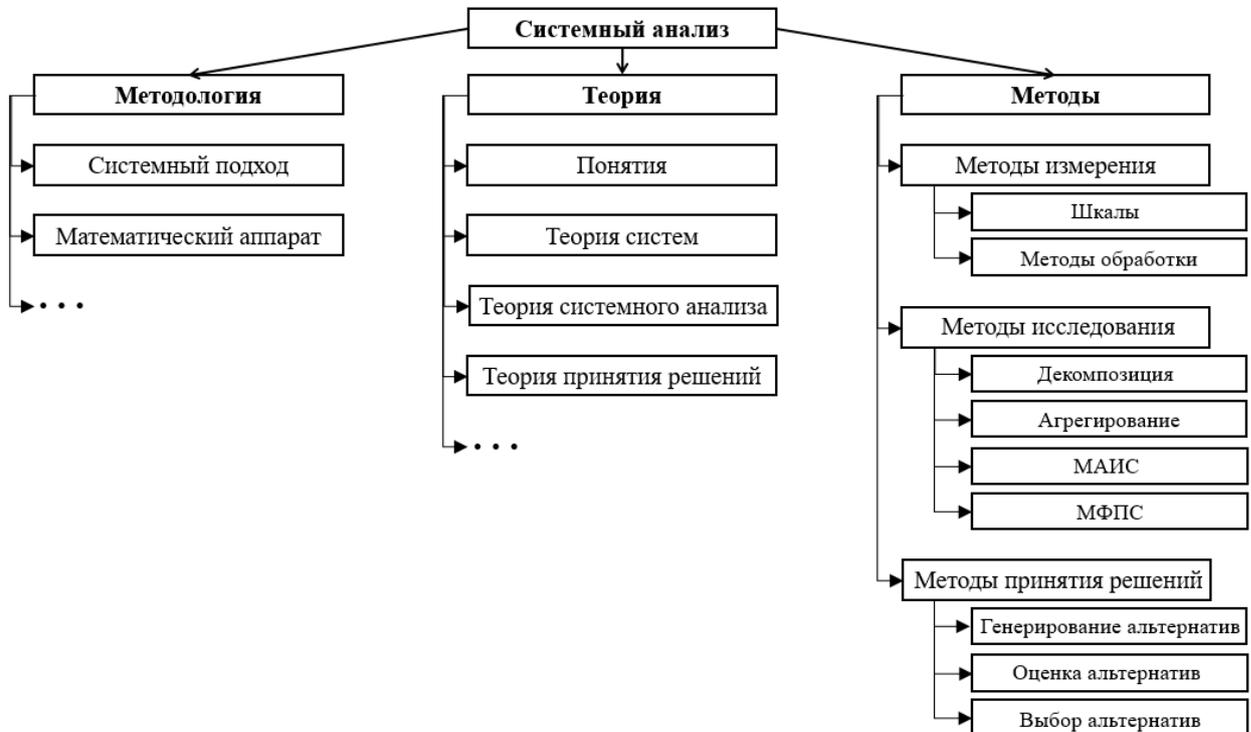


Рис. 2.1. Структура системного анализа

Методы СА делятся на три группы: измерения, исследования и принятия решения.

Методы измерения включают шкалы и методы обработки информации. Для измерения показателей в СА используются различные измерительные шкалы, такие как: номинальная, порядковая, абсолютная, интервальная и другие. Также при СА основную роль играет регистрация и обработка экспериментальных данных.

К методам исследования относятся: агрегирование системы, декомпозиция (структуризация) системы, методы формализованного представления систем (МФПС) и методы активации интуиции и опыта специалистов (МАИС). Агрегирование – это объединение частей в единое целое (систему). При декомпозиции сложная система делится на составляющий (части). Эта операция является противоположной агрегированию.

В данной диссертационной работе с точки зрения системного подхода рассматривается сложная система, состоящая из трех подсистем: химическое произ-

водство, атмосфера, объекты биосферы и социальной сферы. Все они так же состоят из более мелких систем и рассматриваются частично. Так, в химическом производстве интерес имеет ХОО, выступающий в роли ИЗА. Ячеечно-нейросетевое моделирование происходит для приземного слоя атмосферного воздуха вблизи ИЗА. Оценка негативных последствий, а также решения по уменьшению этих последствий принимаются для близлежащей к ИЗА территории (определение ЗЗ, расчет токсодоз, построение оптимальных путей эвакуации для персонала химического производства и местного населения).

Математический аппарат диссертационной работы базируется на математических моделях рассеяния примеси на основе ячейечно-нейросетевого подхода, расчете ЗЗ (площади, длины и ширины) и токсодоз.

В качестве методов СА, которые применяются в данной работе, можно назвать: методы измерения, исследования и принятия решений (рис. 2.1). Так, в работе используются различные шкалы измерения: естественный масштаб исходных данных ИС «ЯНСКА» и получаемых в качестве результатов, логарифмический и нормализованный масштабы. Для исходных данных применяются такие методы обработки, как корреляционный анализ и анализ репрезентативности данных.

Методы исследования представлены в диссертационной работе, например, декомпозицией, – подсистема приземного слоя воздуха разбивается на квадратные ячейки одинакового размера, значения концентраций ЗВ в которых принимаются равными для любой точки внутри ячейки.

По полученным с помощью ИС «ЯНСКА» результатам генерируются различные варианты решений по уменьшению негативных последствий аварии. После альтернативные варианты оцениваются и принимается наиболее оптимальное решение.

Информация об условиях поведения системы не всегда является полной. Выделяется три вида условий: в условиях определенности, в условиях вероятностной определенности и в условиях вероятностной неопределенности. Для анализа поведения системы в вышеперечисленных условиях применяются методы формализованного представления системы.

Так, для анализа системы в условиях определенности, где известна и достоверна вся информация о проблемной ситуации, применяются методы оптимизации (математическое программирование, графический анализ и другие).

В условиях вероятностной определенности, где отсутствует достоверная информация об анализируемой системе, а также показатели, которые используются

для ее описания, имеют вероятностную природу, используют статистические методы, такие как прогнозирование, имитационное моделирование и другие.

В условиях неопределенности, где исходная информация неполна и недостоверна, а также имеет место разнообразное сложное влияние внешних факторов, применяются теория множеств, математическая логика и другие.

Моделирование рассеяния ЗВ в атмосферном воздухе в рамках данной диссертационной работы происходит в условиях неопределенности. Неопределенность связана со следующими факторами:

- непостоянные метеоусловия – изменение (возможно, неоднократное) скорости и/или направления ветра в процессе продолжительного по времени рассеяния примеси ЗВ;
- неоднородность рельефа местности, а также промышленной застройки и застройки населенных пунктов, на территориях, подвергающихся воздействию ЗВ в процессе многокилометрового распространения первичного облака.

Анализ современных методик для решения задач оценки воздействия аварийного загрязнения воздуха промышленными источниками

В настоящее время при решении задач ОВОС аварийного выброса ЗВ в атмосферу используется достаточно большое количество разнообразных методик, реализующих различные математические методы и модели. Указанные методики могут различаться по объекту применения, объекту воздействия, происхождению субъекта воздействия, длительности воздействия, масштабам воздействия и другим классифицирующим признакам [39]. Подробная классификация приведена на рис. 2.2.

Следует отметить, что приведенная на рис. 2.2 классификация во многом похожа на классификацию ИЗА, что вполне логично, так как методы оценки последствий загрязнения и модели распространения примесей в средах определяются во многом классом ИЗА.

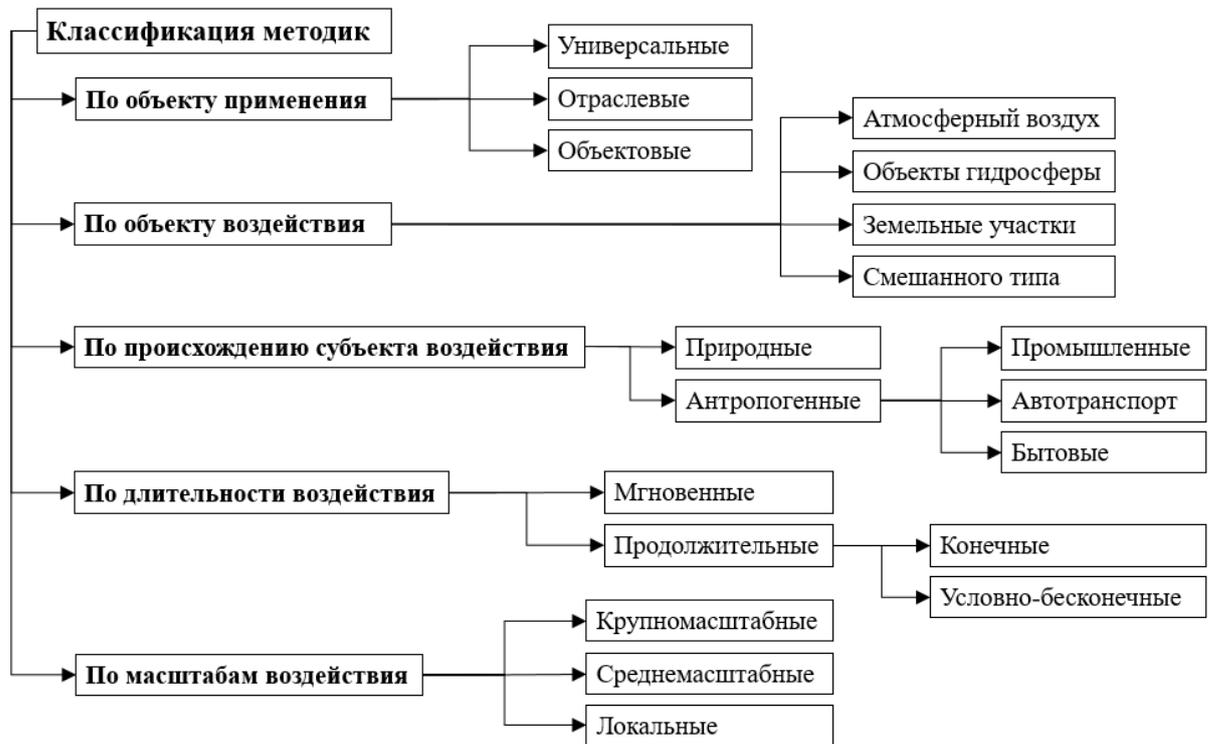


Рис. 2.2. Систематизация методик, используемых для решения задач экологической безопасности

В таблице 2.1. приведен перечень методик, проанализированных в данном разделе.

Таблица 2.1

Методики, используемые для решения задач оценки воздействия на окружающую среду аварийного загрязнения воздуха промышленными источниками

| № п/п. | Обозначение (сокращение) | Полное название, авторский коллектив (организация) | Год издания |
|--------|--------------------------|--|-------------|
| 1 | РД-17-89 | Методические указания по расчету валовых выбросов вредных веществ в атмосферу для предприятий нефтепереработки и нефтехимии (РД-17-89) (Всесоюзный научно-исследовательский институт углеводородного сырья) [90] | 1990 |
| 2 | ОНД-86 | Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий (ОНД-86) (Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова Росгидромета) [43] | 1997 |
| 3 | СДЯВ | Методика прогнозирования масштабов заражения | 2000 |

| № п/п. | Обозначение (сокращение) | Полное название, авторский коллектив (организация) | Год издания |
|--------|--------------------------|---|-------------|
| | | сильнодействующими ядовитыми веществами при авариях (разрушениях) на химически опасных объектах и транспорте (РД 52.04.253–90) (Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова Росгидромета) [91] | |
| 4 | ОНД-86 доп. | Методика расчета осредненных за длительный период концентраций выбрасываемых в атмосферу вредных веществ (Дополнение к ОНД-86) (Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова Росгидромета) [92] | 2005 |
| 5 | Токси-2 | Методика оценки последствий химических аварий (Методика «Токси». Редакция 2.2) (НТЦ «Промышленная безопасность») [64] | 2005 |
| 6 | Токси-3 | Методика оценки последствий аварийных выбросов опасных веществ (Методика «Токси». Редакция 3.1) (НТЦ «Промышленная безопасность») [93] | 2005 |
| 7 | РД-03-26-2007 | Методические указания по оценке последствий аварийных выбросов опасных веществ (РД-03-26-2007) (НТЦ «Промышленная безопасность») [94] | 2008 |
| 8 | СТО Газпром | Расчет выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух и определение размера вреда окружающей природной среде при авариях на магистральных газопроводах (СТО Газпром 2-1.19-530-2011) (ОАО «Газпром») [95] | 2011 |
| 9 | АХОВ | Методика прогнозирования и оценки обстановки при выбросах в окружающую среду хлора и других аварийно химически опасных веществ (Владимиров В. А., Исаев В. С.) [96] | 2012 |
| 11 | ОМиП | Методика оценки масштабов и последствий химических аварий (Рыбка Н. А.) [97] | 2013 |
| 12 | ОМЭН | Нахождение оптимального маршрута эвакуации населения в случае угрозы аварии на химически опасных объектах (Беляев В. Ю., Яковлев А. М.) [98] | 2014 |

РД-17-89 [90] – один из наиболее старых сборников, рассмотренных в рамках данной диссертационной работы. В нем представлен ряд расчетных методик, в основном актуальных и на сегодняшний день, для определения валовых выбросов ЗВ в атмосферу от основных источников нефтеперерабатывающих и нефтехимиче-

ских производств, таких, как резервуары с различными ОХВ, транспортные емкости, дымовые трубы и другие.

Методика ОНД-86 [43] предназначена для расчета концентраций в атмосферном воздухе ЗВ, содержащихся в выбросах промышленных предприятий. Данная методика:

- устанавливает требования в расчете концентраций ЗВ в атмосферном воздухе при размещении и проектировании предприятий, нормировании выбросов в атмосферу реконструируемых и действующих предприятий, а также при проектировании воздухозаборных сооружений;
- позволяет рассчитывать концентрации загрязнения воздуха от одиночного ИЗА, а также от группы ИЗА, учитывая влияние рельефа местности, застройку местности, направление и скорость ветра;
- позволяет проводить расчет загрязнения атмосферы с учетом суммации вредного действия нескольких ОХВ;
- содержит нормы по определению минимальной высоты источников выброса, по установлению предельно допустимых выбросов и определению границ санитарно-защитной зоны предприятий.

В 2005 году к методике ОНД-86 было выпущено дополнение [92], в котором устанавливается методология расчета осредненных за длительный период, например, за год или сезон, концентраций ЗВ в атмосфере от выбросов ХОО.

Методика [91] предназначена для заблаговременного и оперативного прогнозирования масштабов заражения в случае выбросов СДЯВ при авариях на ХОО. Данная методика преследует в качестве основной цели расчет глубины и площади ЗЗ. Она рассчитана на случаи выбросов ЗВ в газообразном и аэрозольном состояниях, но при этом не учитывает агрегатное состояние вещества при его хранении на ХОО. Расчет осуществляется для первичного и вторичного облаков. Первичное облако образуется в атмосфере в момент разрушения емкости. Вторичное – в процессе испарения разлитого вещества с подстилающей поверхности.

Ряд серьезных ограничений методики [91], таких, как единственный сценарий развития аварии – мгновенный выброс, неучет агрегатного состояния, неучет многих физических и физико-химических процессов, характера подстилающей поверхности и других, оставляют возможность применения данной методики только для приближенных и быстрых расчетов.

Методики Токси-2 [64] и Токси-3 [93] предназначены для количественной оценки последствий химических аварий с выбросом ОХВ на промышленном объекте. В методике [64] учтены все возможные сценарии развития аварии, физико-

химические и термодинамические свойства ОХВ и особенности процессов, протекающих при разрушении или разгерметизации оборудования, характер подстилающей поверхности. В методике [93] получили развитие модели, заложенные в методику предыдущего поколения. Кроме того, в ней использована модель рассеяния «тяжелого» газа, учитывающая изменяющуюся по высоте скорость ветра, гравитационное растекание, подмешивание атмосферного воздуха в облако за счет турбулентности, фазовые переходы в облаке, теплообмен с подстилающей поверхностью.

Методические указания РД-03-26-2007 [94], разработанные в НТЦ «Промышленная безопасность», применяются для расчетов выбросов ОХВ, плотность которых на месте выброса больше плотности воздуха при соответствующих условиях. Данная методика позволяет решать следующие задачи ОВОС выбросов ЗВ:

- определять количество ЗВ при различных сценариях аварийных выбросов ОХВ в атмосферу;
- определять пространственно-временное поле концентраций ОХВ в атмосфере, в том числе зоны опасного воздействия на ОС;
- рассчитывать размеры зон заражения, соответствующих различной степени поражения людей, определяемой по ингаляционной токсодозе, в том числе с учетом времени накопления токсодозы.

Стандарт [95], разработанный ООО «Газпром ВНИИГАЗ», позволяет рассчитать объемы выбросов ЗВ и размера платы за причиненный вред компонентам ОС при авариях на магистральных газопроводах. Действие настоящего стандарта распространяется на линейную часть магистральных газопроводов, включая газопроводы-отводы, и площадочные объекты магистральных газопроводов (газоизмерительные, газораспределительные и компрессорные станции).

Для получения информации в оперативных целях авторами [96] была предложена методика АХОВ (таблица 2.1). Она предназначена для решения таких задач, как:

- расчет глубины и площади ЗЗ;
- расчет времени подхода облака ЗВ к производственным участкам и населенным пунктам;
- определение продолжительности действия ИЗА;
- ориентировочная оценка количества пораженных и их структуру среди производственного персонала и местного населения, оказавшихся в зоне ЧС;

- прогноз и оценка химической обстановки при заражении воздуха наиболее распространенными АХОВ, с использованием коэффициентов эквивалентности и расчетных данных по хлору.

Методика [97] может быть использована для решения задач по прогнозированию химических аварий, их причин, масштабов и последствий. Данная методика разработана для производственного объекта на котором используются или хранятся АХОВ.

В направлении задач по ППР авторами методики [98] предложена процедура нахождения оптимального маршрута эвакуации населения в случае угрозы поражения ОХВ. В рамках данной работы была реализована процедура расчета вероятности токсического поражения при авариях на ХОО, с учетом рельефа местности по которому проходит маршрут эвакуации человека.

Как следует из проведенного анализа, существующие методики рассматривают различные аспекты аварийного загрязнения атмосферы и различаются, главным образом, целями расчетов и объектами исследования. Важно отметить, что изменение условий ОС в методиках затрагиваются минимально и в основном это касается рельефа местности. Вопрос изменения метеорологических характеристик в процессе рассеяния примеси современными расчетными методиками практически не изучен.

2.2. Обоснование выбора ячеечно-нейросетевого подхода как математического аппарата анализа последствий аварийного загрязнения атмосферы

Основные элементы, классификация, принципы работы и терминология искусственных нейронных сетей

Искусственный нейрон является структурной единицей ИНС и представляет собой аналог биологического нейрона. С математической точки зрения – это сумматор всех входящих сигналов, применяющий к полученной взвешенной сумме некоторую простую, в общем случае, нелинейную функцию, непрерывную на всей области определения. Обычно данная функция монотонно возрастает. Полученный результат посылается на единственный выход. Искусственные нейроны (в дальнейшем нейроны) объединяются между собой определенным образом, образуя ИНС. Каждый нейрон характеризуется своим текущим состоянием по аналогии с нервными клетками головного мозга, которые могут быть возбуждены или затормо-

жены. Он обладает группой **синапсов** – однонаправленных входных связей, соединенных с выходами других нейронов, а также имеет **аксон** – выходную связь данного нейрона, с которой сигнал поступает на синапсы следующих нейронов. Каждый синапс характеризуется величиной синаптической связи или ее весом w_i , который является эквивалентом электрической проводимости биологических нейронов. Схема структуры искусственного нейрона приведена на рис. 2.3 [99].

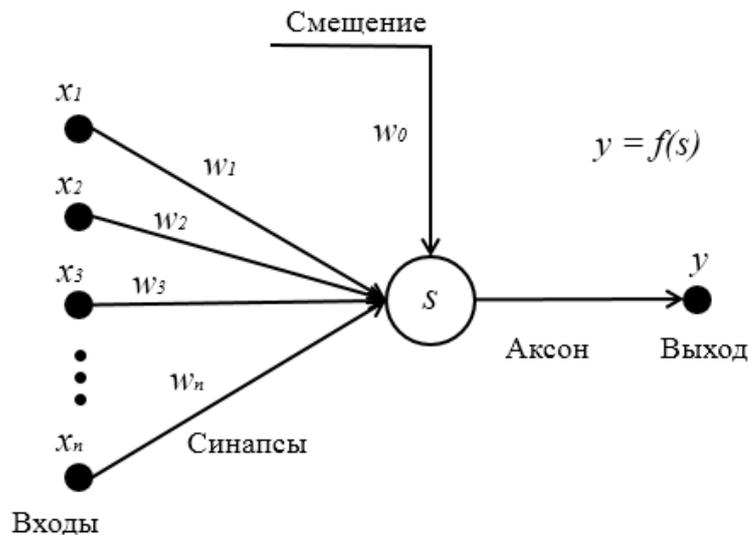


Рис. 2.3. Схема искусственного нейрона

Текущее состояние нейрона определяется, как взвешенная сумма его входов:

$$s = \sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i + w_0 \quad (2.1)$$

где w_0 – коэффициент смещения нейрона (вес единичного входа).

Выход нейрона есть функция его состояния:

$$y = f(s) \quad (2.2)$$

Функция активации является основным нелинейным преобразователем сигнала в ИНС. Наиболее часто используется сигмоидальная (логистическая) функция активации:

$$f(s) = \frac{1}{1 + e^{-\alpha s}} \quad (2.3)$$

где α – параметр насыщения активационной функции.

Область допустимых значений (ОДЗ) этой функции соответствует интервалу $(0, 1)$. Также могут использоваться такие функции активации как пороговая, знаковая (сигнатурная), линейная, полулинейная, треугольная, радиально базисная (Гауссова) и другие.

Ступенчатая функция наиболее простая и не позволяет моделировать схемы

с непрерывными сигналами. Отсутствие первой производной затрудняет применение градиентных методов для обучения нейронов с такой активационной функцией.

ИНС присущ принцип параллельной обработки сигналов, который достигается путем объединения большого числа нейронов в так называемые слои и соединения определенным образом нейронов различных слоев, а также в некоторых конфигурациях, и нейронов одного слоя между собой, причем обработка взаимодействия всех нейронов ведется послойно.

Как известно, существует огромное множество парадигм ИНС. Все зависит от исследуемой задачи, для решения которой применяется аппарат ИНС. В случае моделирования процесса загрязнения атмосферного воздуха необходимо максимально использовать прогнозирующую способность ИНС. Задача прогнозирования успешно решается при помощи многослойных перцептронов, которые, в свою очередь, являются универсальными аппроксиматорами. Многослойная ИНС с сигмоидными передаточными функциями является наиболее общей, универсальной сетевой архитектурой. Имеются различные структуры многослойных сетей: с последовательными, перекрестными и обратными связями, с фиксированной переменной структурой. В данной работе используются многослойные ИНС прямого пространства с последовательными связями.

Нейроны в сетях такого типа делятся на группы с общим выходным сигналом – слои, при этом на каждый нейрон первого слоя подаются все элементы внешнего выходного сигнала, а все выходы нейронов q -го слоя подаются на каждый нейрон слоя $(q+1)$. Нейроны выполняют взвешенное (с синаптическими весами) суммирование элементов выходных сигналов; к данной сумме прибавляется смещение нейрона. Над полученным результатом затем выполняется нелинейное преобразование с помощью активационной функции. Значение функции активации есть выход нейрона [99].

Рассмотрим в качестве примера двухслойный перцептрон (рис. 2.4), нейроны которого имеют активационную функцию в виде единичного скачка.

На n входов сети поступают входные сигналы x_i , проходящие по синапсам на 3 нейрона, образующие единственный слой этой ИНС и выдающие три выходных сигнала:

$$y_j = f\left[\sum_{i=1}^n x_i \cdot w_{ij} + w_0\right], \quad j \in [1, 3] \quad (2.4)$$

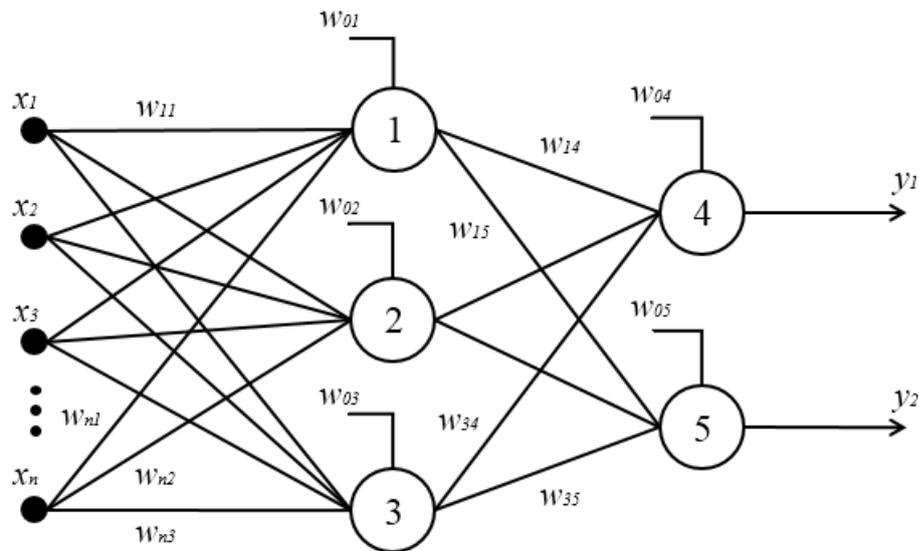


Рис. 2.4. Схема двухслойного перцептрона

Очевидно, что все весовые коэффициенты синапсов одного слоя нейронов можно свести в матрицу W , в которой каждый элемент w_{ij} задает величину i -ой синаптической связи j -ого нейрона. Таким образом, процесс, происходящий в ИНС, может быть записан в матричной форме:

$$Y = f(X \cdot W) \quad (2.5)$$

где X и Y – соответственно входной и выходной сигнальные векторы (здесь под вектором понимается вектор-строка), $f(V)$ – активационная функция, применяемая поэлементно к компонентам вектора V , равного произведению $X \cdot W$.

Обучение искусственных нейронных сетей прямого распространения.

Алгоритм обратного распространения ошибок

Алгоритмы обучения бывают как с учителем, так и без него. Алгоритм называют алгоритмом с учителем, если при обучении известны и входные, и выходные вектора сети, то есть имеются пары вход плюс выход – известные условия задачи и ее решение. В процессе обучения сеть меняет свои параметры и учится давать нужное отображение – результаты, которые нам уже известны. За счет способности к обобщению, сетью могут быть получены новые результаты, если подать на вход вектор, который не встречался при обучении.

Алгоритм относится к обучению без учителя, если известны только входные вектора, и на их основе сеть учится давать наилучшие значения выходов. Что понимается под «наилучшими» – определяется алгоритмом обучения.

Задача обучения ИНС ставится следующим образом: подобрать такие значения параметров сети, чтобы ошибка была минимальной для данного обучающего

множества.

Большая часть методов обучения – итерационные. Параметрам сети присваиваются малые начальные значения. Затем параметры изменяются так, чтобы ошибка убывала. Изменения продолжают до тех пор, пока ошибка не станет достаточно малой.

Для обучения ИНС могут использоваться следующие алгоритмы:

- алгоритмы локальной оптимизации с вычислением частных производных первого порядка;
- алгоритмы локальной оптимизации с вычислением частных производных первого и второго порядка;
- стохастические алгоритмы оптимизации;
- алгоритмы глобальной оптимизации.

К первой группе относятся: градиентный алгоритм (метод наискорейшего спуска); методы с одномерной и двумерной оптимизацией целевой функции в направлении антиградиента; метод сопряженных градиентов; методы, учитывающие направление антиградиента на нескольких шагах алгоритма.

Ко второй группе относятся: метод Ньютона, методы оптимизации с разреженными матрицами Гессе, квазиньютоновские методы, метод Гаусса-Ньютона, метод Левенберга-Марквардта и другие.

Стохастическими методами являются: поиск в случайном направлении, имитация отжига, метод Монте-Карло (численный метод статистических испытаний).

Задачи глобальной оптимизации решаются с помощью перебора значений переменных, от которых зависит целевая функция.

Для сходимости алгоритма достаточно, чтобы на каждой итерации обеспечивалась существенная убыль функции ошибки. На практике сходимость алгоритма определяется методом проб и ошибок. Теория не дает точных данных о количестве итераций, требуемых для обучения сети под конкретную задачу. Также неизвестно, сможет ли вообще ИНС обучиться ее решению.

В данной диссертационной работе для обучения ИНС использовался **алгоритм обратного распространения ошибки**, который был предложен в [100], и адаптирован для сигмоидальной функции активации нейронных элементов в [99]. Предложенный алгоритм является эффективным средством для обучения многослойных ИНС.

Рассмотрим ИНС, состоящую из трех слоев (рис. 2.5). Обозначим слои нейронных элементов от входа к выходу соответственно через k , i , j , а входной вектор значений через l . Тогда выходное значение j -го нейрона последнего слоя:

$$y_j = f(s_j) \quad (2.6)$$

$$s_j = \sum_{i=1}^n w_{ij} \cdot y_i + w_{0j} \quad (2.7)$$

где s_j – взвешенная сумма j -го нейрона выходного слоя; y_i – выходное значение i -го нейрона предпоследнего слоя; w_{ij} и w_{0j} – соответственно весовой коэффициент и смещение j -го нейрона выходного слоя. Для расчета $f(s_j)$, в работе используется сигмоидальная функция активации (2.3).

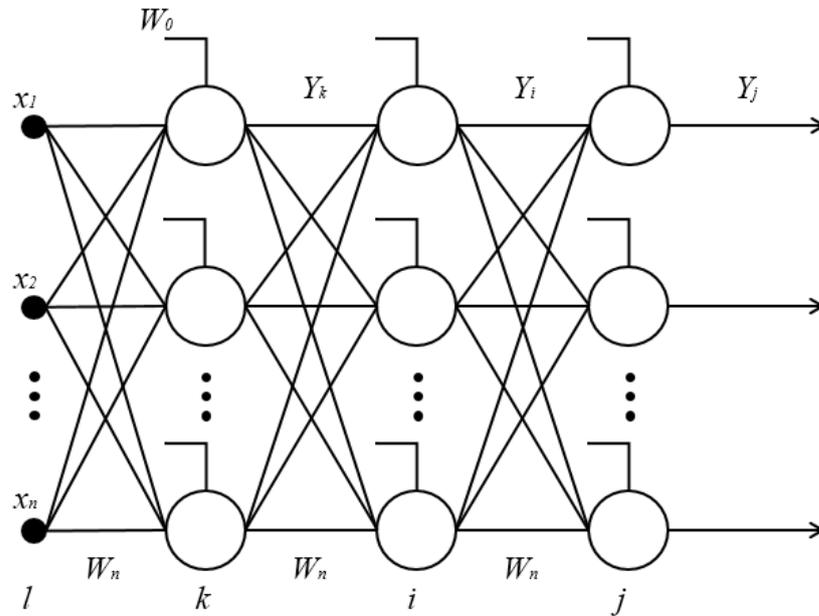


Рис. 2.5. Трехслойная нейронная сеть

Аналогичным образом рассчитывается выходное значение i -го нейрона предпоследнего слоя:

$$y_i = f(s_i) \quad (2.8)$$

$$s_i = \sum_{k=1}^n w_{ki} \cdot y_k + w_{0i} \quad (2.9)$$

И соответственно для k -го слоя:

$$y_k = f(s_k) \quad (2.10)$$

$$s_k = \sum_{l=1}^n w_{lk} \cdot x_l + w_{0k} \quad (2.11)$$

Алгоритм обратного распространения ошибки минимизирует ошибку ИНС. Для этого с целью настройки синаптических связей используется метод градиентного спуска в пространстве весовых коэффициентов ИНС. Изменение весовых коэффициентов, для всех слоев, кроме первого, происходит по следующему правилу:

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + \Delta w_{ij} \quad (2.12)$$

$$\Delta w_{ij} = v \cdot \delta_j \cdot y_i \quad (2.13)$$

$$\Delta w_{0j} = v \cdot \delta_j \quad (2.14)$$

где v – коэффициент скорости обучения ИНС; δ_j – ошибка j -го нейрона.

Для первого скрытого слоя нейронов коррекция весовых коэффициентов происходит не по выходам предыдущего слоя, а по входам ИНС:

$$\Delta w_{lk} = v \cdot \delta_k \cdot x_l \quad (2.15)$$

Для выходного слоя ошибка j -го нейрона определяется по формуле:

$$\delta_j = \alpha \cdot y_j \cdot (1 - y_j) \cdot (y_j^{\text{э}} - y_j) \quad (2.16)$$

где $y_j^{\text{э}}$ – эталонное выходное значение j -го нейрона.

Для любого скрытого слоя i ошибка i -го нейронного элемента определяется рекурсивным образом через ошибки нейронов следующего слоя j :

$$\delta_i = \alpha \cdot y_i \cdot (1 - y_i) \cdot \sum_{j=1}^n \delta_j \cdot w_{ij} \quad (2.17)$$

Алгоритм обратного распространения ошибки можно разбить на три этапа: прямое распространение сигнала, обратное распространение сигнала и пересчет весовых коэффициентов [101], которые представлены схематично на примере двухслойной ИНС (рис. 2.6 – 2.8).

Перед обучением ИНС задаются значение коэффициента скорости обучения v (положительная константа или переменная величина в пределах $(0, 1]$, постепенно уменьшающаяся в процессе обучения ИНС) и параметр насыщения активационной функции α ($\alpha \neq 0$), а также определяются начальные значения всех весовых коэффициентов, которые, как правило, генерируются случайным образом в пределах от $-0,3$ до $0,3$ включительно.

На первом этапе алгоритма (рис. 2.6) на входы ИНС подается входной вектор одного из примеров обучающей выборки. Производится прямое распространения сигнала по ИНС, в ходе которого последовательно, от слоя к слою, рассчитываются выходные значения нейронов.

На этапе обратного распространения сигнала (рис. 2.7) рассчитываются ошибки всех нейронных элементов, причем расчет ведется от последнего слоя нейронов к первому по формулам (2.16) и (2.17) соответственно.

Далее для всех слоев нейронов пересчитываются весовые коэффициенты по формулам (2.12 – 2.15). Данный этап схематично представлен на рис. 2.8.

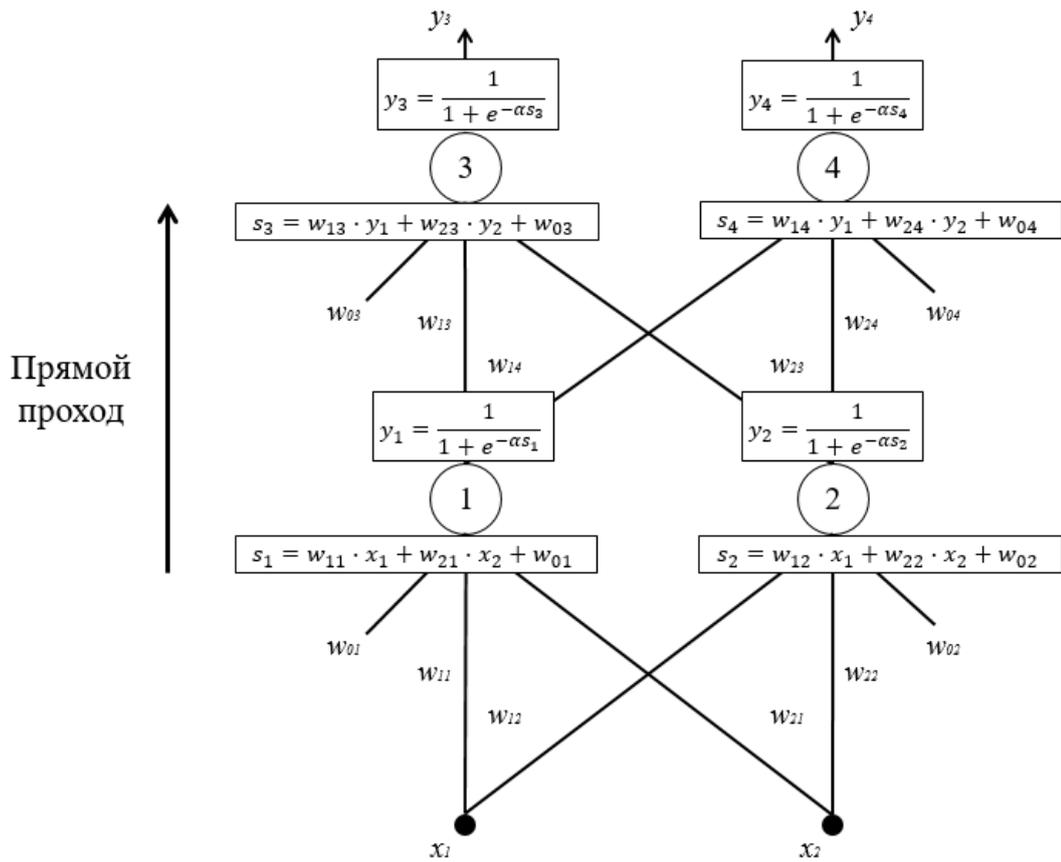


Рис. 2.6. Прямое распространение сигнала

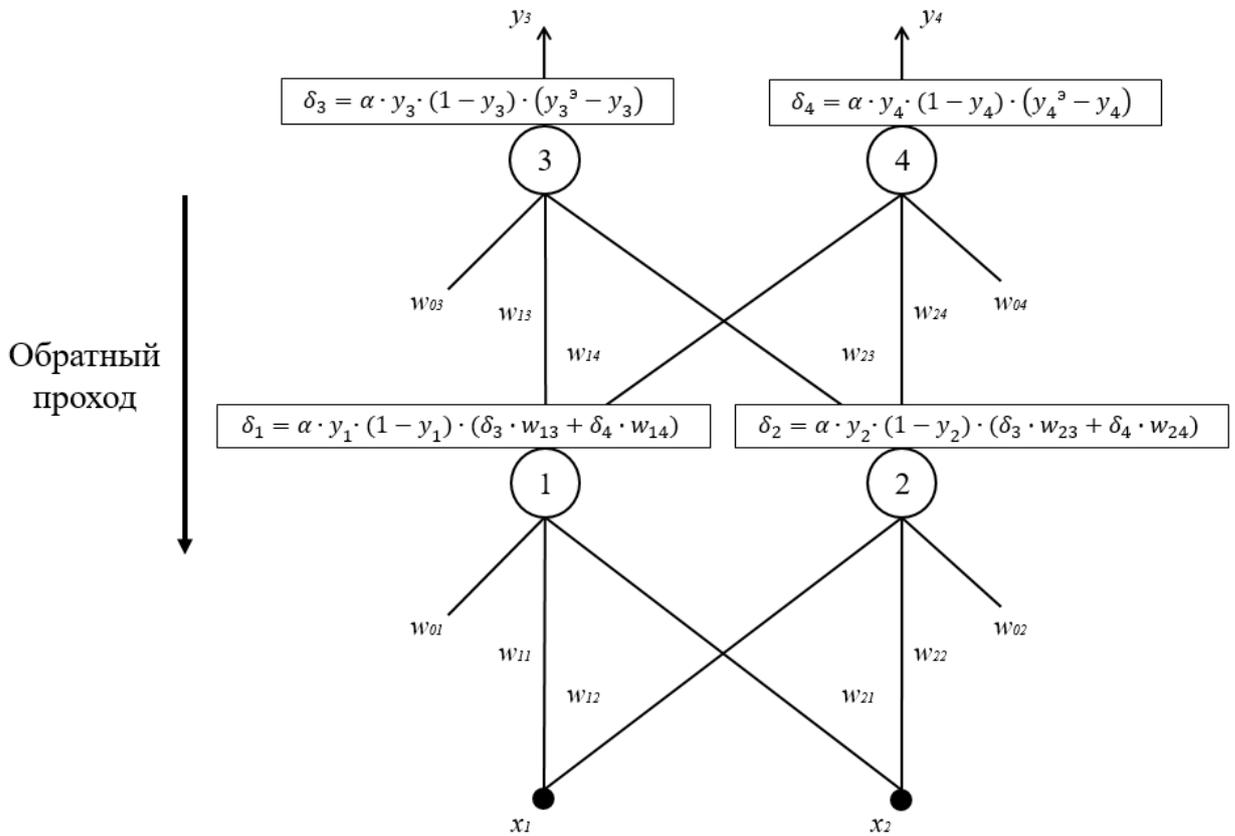


Рис. 2.7. Обратное распространение сигнала

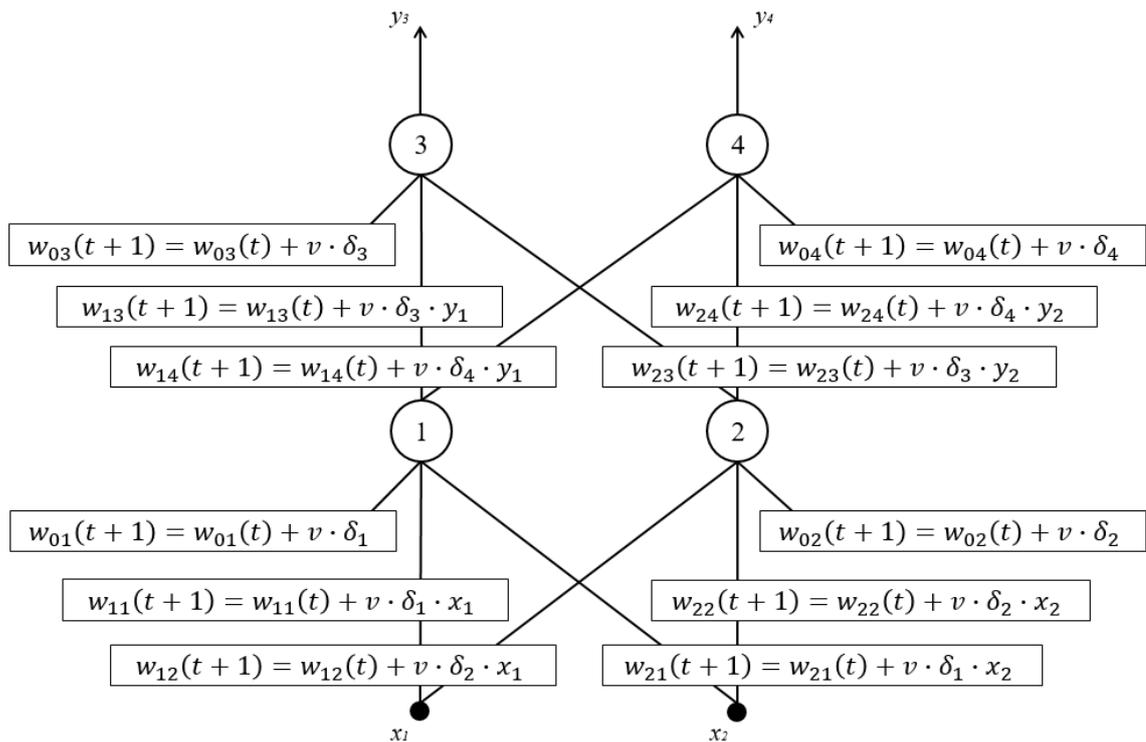


Рис. 2.8. Пересчет весовых коэффициентов

Цикл из трех этапов, описанных выше, повторяется до тех пор, пока не будет выполнено одно или несколько условий, при которых ИНС считается обученной [99]:

- достигнут удовлетворительный уровень ошибки по всем обучающим примерам (или тестовым примерам);
- не происходит уменьшения ошибки на протяжении заданного количества эпох обучения;
- исчерпано заданное количество эпох обучения;
- исчерпано заданное физическое время обучения.

Алгоритм обратного распространения ошибки, в основе которого лежит градиентный метод, создает ряд проблем при обучении многослойных ИНС. К таким проблемам можно отнести следующие:

- неизвестность выбора числа слоев и количества нейронных элементов в слое для многослойных сетей;
- медленную сходимость градиентного метода с постоянным шагом обучения;
- сложность выбора подходящей скорости обучения v . Так, слишком малая скорость обучения увеличивает время обучения и приводит к скатыванию ИНС в локальный минимум. Большая скорость обучения может привести

к пропуску глобального минимума и сделать процесс обучения расходящимся;

- невозможность определения точек локального и глобального минимумов, так как градиентный метод их не различает;
- влияние случайной инициализации весовых коэффициентов ИНС на поиск минимума функции ошибки.

Последний пункт отражает, что при разной инициализации синаптических связей могут получаться различные решения задачи. Это характеризует неустойчивость ритма обучения, когда ИНС в одних случаях может обучаться до требуемой суммарной ошибки, а в других нет. То, что алгоритм обратного распространения ошибки не позволяет в общем случае достичь глобального минимума, не умаляет его достоинств, так как во многих практических задачах достаточно обучить ИНС до требуемой ошибки. Является ли при этом найденный минимум локальным или глобальным, не имеет большого значения.

Основные элементы ячеечно-нейросетевых моделей

Как было описано ранее (см. п. 1.4), базовые идеи, положенные в основу функционирования ЯНМ, заимствованы из теорий ячеечных моделей и клеточных автоматов. Основные теоретические положения, используемые при работе с ЯНМ, представлены в статье [52].

Так, при использовании ЯНМ исследуемую среду необходимо разделить на одинаковые по размеру и форме ячейки (рис. 2.9), в соответствии с концепцией, заложенной в ячеечные модели. В один и тот же момент времени состояние среды в любой точке ячейки одинаково, а в различных ячейках, в общем случае, различается.

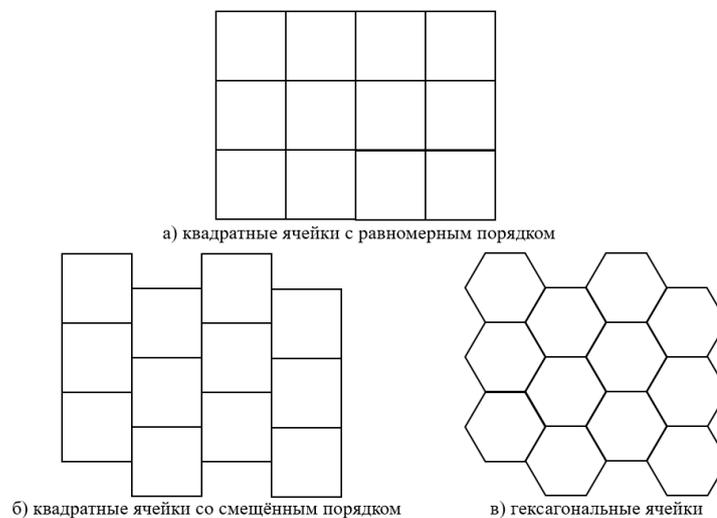


Рис. 2.9. Стандартные формы и порядки расположения ячеек на плоскости

Состояние среды изменяется в зависимости от движущих сил, которые обусловлены градиентом концентрации, температуры или других физико-химических характеристик, и от случайных внешних воздействий (возмущений), не связанных с состоянием самой среды.

Входными переменными ЯНМ могут быть как состояния ячеек и внешние условия, так и различные другие характеристики, непосредственно влияющие на процесс. Выходными переменными модели являются состояния тех же самых ячеек в более поздний момент времени или состояния соседних ячеек.

Связь между входными и выходными состояниями ячеек устанавливается с помощью ИНС прямого распространения или сети на основе радиально-симметричных функций (RBF-сети). В большинстве случаев такая сеть не потребует сложной многослойной и многонейронной структуры. Обучение ИНС должно происходить на основе экспериментальных данных об изменении состояния среды.

Рассмотрим основные понятия, используемые при работе с ЯНМ:

Ячейка – ограниченный участок пространства, однородный по состоянию среды во всех точках.

Состояние ячейки – вектор параметров среды, одинаковый во всех точках ячейки.

Характеристический размер ячейки – линейная численная характеристика, характеризующая размер ячейки. Определяется по соотношениям:

$$l = \sqrt{S_c} \quad (2.18)$$

или

$$l = \sqrt[3]{V_c} \quad (2.19)$$

где S_c – площадь основания ячейки (для двухмерных моделей), V_c – объем ячейки (для трехмерных моделей). В зависимости от масштабов моделирования характеристический размер может измеряться в миллиметрах или метрах.

Ячеечная плотность – численная характеристика, характеризующая количество элементарных ячеек, приходящихся на единицу размера пространства:

- ячеечная плотность первого порядка – на единицу длины пространства;
- ячеечная плотность второго порядка – на единицу площади пространства;
- ячеечная плотность третьего порядка – на единицу объема.

Форма ячейки определяется количеством, размером и взаимным расположением граней основания ячейки. Как правило, в качестве формы выбирают правильные геометрические фигуры и тела. Так, для описания изменения состояния

среды в одной плоскости, обычно используются квадратные (рис. 2.9 а, б) или гексагональные ячейки (рис. 2.9 в).

Анализ различных форм плоских ячеек показывает, что в случае квадратной ячейки сторона ее основания равна характеристическому размеру. В случае гексагональной ячейки сторона основания (a) и характеристический размер взаимосвязаны по соотношению:

$$l = a \cdot \sqrt[4]{6,75} \quad (2.20)$$

Для описания изменения состояния среды в трехмерном пространстве наиболее целесообразно использовать кубические ячейки с равномерным порядком или со смещением (рис. 2.10).

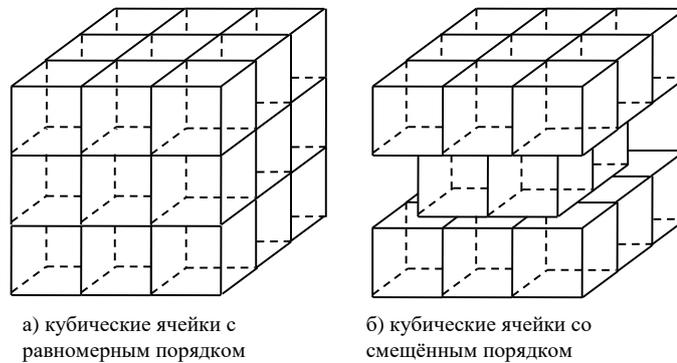


Рис. 2.10. Стандартные формы и порядки расположения ячеек в пространстве

Для ячеек кубической формы характеристический размер, очевидно, совпадает с размером грани куба.

Порядок расположения ячеек определяется их взаимным местонахождением относительно друг друга. Так, например, квадратные и кубические ячейки могут располагаться равномерно (рис. 2.9, 2.10 а) или со смещением (рис. 2.9, 2.10 б).

Сетка – множество ячеек, имеющих одинаковые размер, форму и порядок расположения.

Узлы (узловые точки) – множество точек пространства, представляющих собой центры масс вершин оснований ячеек сетки (рис. 2.11). Узлы наиболее удобно использовать при работе с ЯНМ, так как состояние ячеек в целом определяется именно состояниями в узловых точках. Так, например, узловые точки квадратных ячеек с равномерным порядком образуют вершины квадратов такого же размера, как основания ячеек; узловые точки квадратных ячеек со смещенным порядком – вершины равнобедренных треугольников с основаниями, равными сторонам квадратов базовых ячеек; узловые точки гексагональных ячеек – вершины равносторонних треугольников.

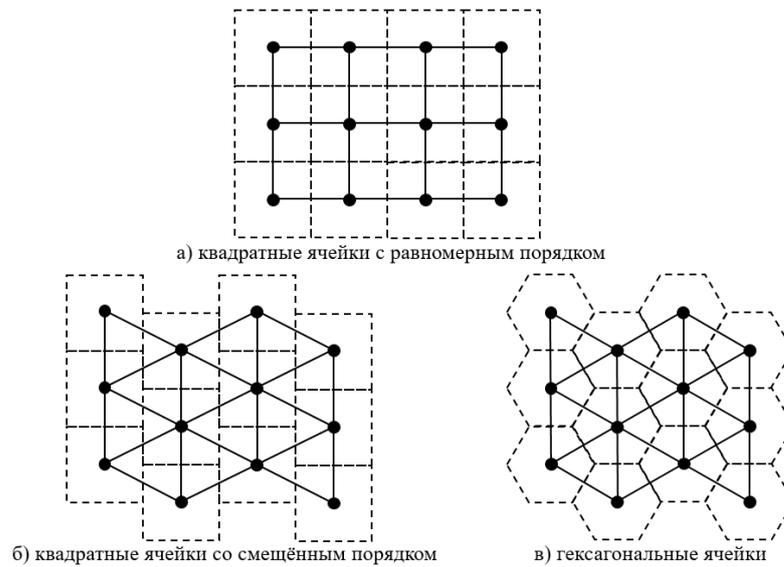


Рис. 2.11. Характер расположения узловых точек в ячейках различной формы и с различным порядком расположения на плоскости

Абсолютные координаты ячейки – значения абсциссы, ординаты и аппликаты узла ячейки относительно некоторого начала отсчета, принятого в выбранной системе координат, выраженные в единицах длины. Для двумерной сетки значения аппликаты всех узлов принимаются одинаковыми и не используются при моделировании.

Уровень ячеек – группа ячеек, каждая из которых хотя бы одной гранью или вершиной прилегает соответственно к грани или вершине любой ячейки нижестоящего и вышестоящего уровней. Пример определения уровней ячеек представлен на рис. 2.12. В качестве базового (нулевого) уровня выбирается единственная элементарная ячейка.

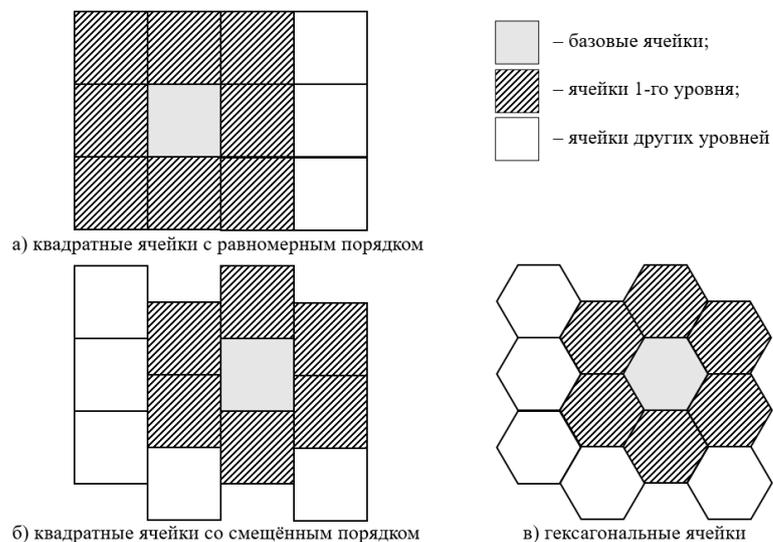


Рис. 2.12. Определение уровней ячеек на плоскости

Ранг ячеек определяется степенью близости узлов ячеек окружения одного уровня, к узлу соответствующей им базовой ячейки (рис. 2.13). Чем ближе расположены друг к другу две ячейки, тем сильнее влияние их состояний друг на друга. Таким образом, чем больше ранг ячеек на выбранном уровне, тем слабее они влияют на состояния ячеек меньших уровней, включая базовую ячейку. В этой связи при структурной идентификации ЯНМ можно использовать не все, а часть рангов последнего значимого уровня ячеек в наборе входных состояний среды.

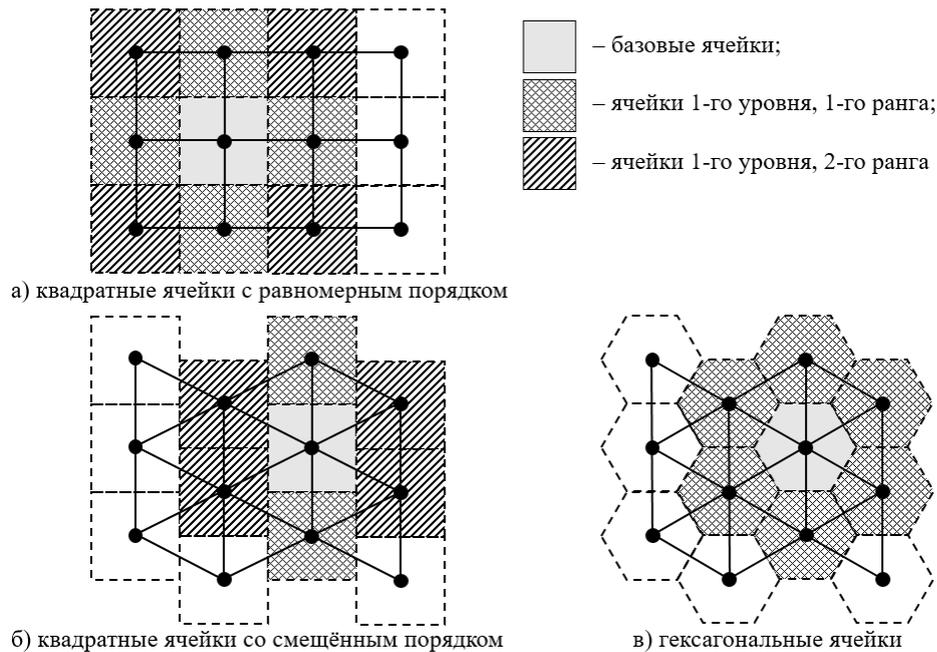


Рис. 2.13. Определение рангов ячеек на плоскости

В большинстве случаев при работе с ЯНМ используются ячейки не выше второго уровня. Использование более высоких уровней приводит к значительному повышению размерности решаемой задачи, усложнению структуры ИНС и, как следствие, к сложностям, возникающим при формировании выборок данных, и росту объемов вычислений.

Классификация ячеечно-нейросетевых моделей

Исходя из описанных выше свойств и особенностей ЯНМ, предлагается их классифицировать следующим образом.

В качестве классифицирующих признаков рассмотрим размерность пространства среды, состав выходных переменных, систему отсчета, временную глубину, форму ячеек, порядок их расположения, количество уровней и наполненность последнего уровня. Подробно классификация приведена на рис. 2.14.



Рис. 2.14. Классификация ячеечно-нейросетевых моделей

Рассмотрим особенности различных классов ЯНМ:

Трёхмерные модели применяются при необходимости моделирования изменения состояния среды в пространстве трех координат. Это чаще всего мелкомасштабные модели с высокой ячеечной плотностью, характерные для описания процессов, протекающих в объемном технологическом оборудовании.

Плоскостные модели используются, если поставленная задача удовлетворяет условию достаточности моделирования изменения состояния среды в двухмерном пространстве.

Модели с **единственным выходом** представляют собой нейросетевой аналог алгебраической функциональной зависимости от нескольких аргументов. Используются, если необходимо рассчитать состояние только одной ячейки.

Модели с **несколькими выходами** – это сложные многосвязные зависимости, для которых характерно влияние всего множества входных переменных на множество выходных. Кроме того, возможно присутствие скрытого влияния выходных переменных друг на друга. К данному виду можно отнести модели, в состав выходных переменных которых входит серия состояний одной ячейки, рассчитанных для различных моментов времени, либо множество состояний различных ячеек, рассчитанных для одного момента времени.

Пространственные модели позволяют получить неизвестные состояния определенной ячейки при помощи экстраполяции по известным состояниям соседних ячеек в тот же самый момент времени.

Временные модели позволяют проследить изменение состояний ячеек пространства во времени. Здесь кроме условий внешней среды в качестве входных переменных используются переменные состояний центральной ячейки и ячеек ее окружения в последний известный момент времени (для **одномоментных** моделей), а также в два или более моментов (для **двухмоментных** и **многомоментных** моделей). Выходная переменная – это состояние центральной ячейки в следующий момент времени. Кроме того, для многосвязных моделей выходами будут также состояния ячеек ее окружения. В последнем случае одна обученная ИНС позволяет оценить состояние на единственно возможный интервал времени вперед. Однако, подавая на вход той же сети полученные результаты вычислений, можно получить серию значений.

Особенности моделей с различной формой и порядком расположения ячеек определяются степенью взаимного влияния ячеек, что, в свою очередь, связано с уровнями и рангами ячеек.

Если на вход ИНС помимо условий внешней среды подается состояние только базовой ячейки, такая модель называется **одноуровневой**. Если, дополнительно, – первого или обоих рангов 1-го уровня – **двухуровневой**. В случае подачи на вход состояний группы ячеек хотя бы одного ранга 2-го или последующих уровней – **многоуровневой**. Наиболее часто используются двухуровневые ЯНМ как обеспечивающие достаточную точность вычислений при относительно простом составе входных переменных ИНС.

При необходимости усложнения состава входов ИНС последовательно добавляются состояния ячеек следующих рангов последнего задействованного уровня и только по исчерпанию всех рангов берут новый уровень ячеек. Таким образом, в составе входных переменных ИНС не могут быть использованы состояния ячеек, расположенные дальше от центра (а значит в меньшей степени влияющие на состояние базовой ячейки), чем еще не задействованные, но ближе лежащие.

Если в составе входных переменных использованы состояния ячеек всех рангов последнего входящего в него уровня, такая модель называется **полноуровневой**. В противном случае модель – **неполноуровневая**.

2.3. Постановки задач ячеечно-нейросетевого моделирования последствий аварийного загрязнения атмосферы промышленными источниками

Выбор метода ячеечно-нейросетевого моделирования в качестве основного аппарата для оценки последствий аварийных выбросов в атмосферу обусловлен его особенностями и преимуществами. Так, в статье [102] отмечается, что благодаря временной и пространственной дискретизации полей концентрации и использованию в одной обучающей выборке примеров, полученных при различных исходных данных, в ЯНМ можно задавать сценарии изменения условий внешней среды. Таким образом, получаются поля концентрации, в большей степени соответствующие реальной картине, и, как следствие, точнее рассчитываются экологические и социальные последствия химических аварий.

В данной главе рассматриваются различные виды ЯНМ, которые использовались в рамках диссертационной работы для решения задач ОВОС аварийного выброса ОХВ на промышленном объекте. Представленные модели разработаны на основе теоретических положений, изложенных в п. 2.2.

Основываясь на них, сформулируем общую постановку задачи ячеечно-нейросетевого моделирования на примере оценки экологических последствий аварийного выброса ОХВ и его распространения в атмосферном воздухе на территории, прилегающей к химическому производству.

Объект моделирования – примесь ЗВ, присутствующая в воздухе в результате аварийного выброса, и ее поведение (изменение концентрации) во времени и пространстве. Цель моделирования – возможность оценки концентрации примеси, продолжительности негативного воздействия на ОС, в том числе живые организмы и человека, и размеров территории, подвергшейся негативному воздействию.

В соответствии с концепцией, заложенной в ячеечные модели, концентрация ЗВ в любой точке одной ячейки в один и тот же момент времени одинакова. Концентрации в различных ячейках в один и тот же момент времени в общем случае различаются.

Принимаем, что движение среды (примеси) осуществляется от каждой ячейки к ее соседям и обратно под влиянием движущих сил, обусловленных градиентом концентрации ЗВ, условиями внешней среды и другими при отсутствии внешней границы, делающей такое движение невозможным. Естественной преградой, препятствующей процессу распространения примеси, является поверхность земли.

При решении задач экологической безопасности наиболее существенное значение уделяется моделированию поведения примеси в приземном слое, где обитает абсолютное большинство организмов, которые могут пострадать в результате загрязнения воздушного бассейна, живут и работают люди. Так, замеры концентраций примесей в воздухе, оценки токсического воздействия на человека проводятся на высоте 1,5 – 2 м от уровня земли.

Кроме того, процессы распространения примеси в приземном слое существенно отличаются от аналогичных процессов на больших расстояниях от земли ввиду ряда особенностей, связанных с поглощением небольшого количества примеси земной поверхностью, изменением направления распространения вследствие особенностей рельефа местности, атмосферной инверсии и другим. Таким образом, модели распространения осложняются необходимостью дополнительного учета факта близости к земной поверхности и ее природы.

Все вышеперечисленное обуславливает не только возможность, но и целесообразность допущения о рассмотрении единственного (приземного) слоя пространства распространения ЗВ. При этом его высота может быть любой, в том числе и такой, на которой наиболее важно оценивать концентрации, токсодозы, размеры ЗЗ и тому подобное.

Очевидно, что смоделированная концентрация примеси в любой точке ячейки тогда должна быть предельно близка по величине к реальной концентрации в точке пространства, совпадающей координатами с центром масс вершин данной ячейки на заранее оговоренной высоте, например, 2 м.

Для прогнозирования концентрации в точке на один или несколько заданных моментов времени, используются ЯНМ на основе окрестности, состоящей из пяти квадратных ячеек (рис. 2.15) (в теории клеточных автоматов – окрестность фон Неймана [103]). Аналогичная окрестность используется для прогнозирования поля концентраций на один или несколько заданных моментов времени.

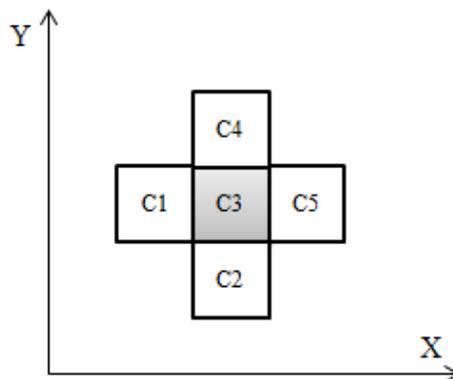


Рис. 2.15. Расположение ячеек окрестности фон Неймана

Общая схема ЯНМ, а также основные этапы работы с ними подробно описаны в статье [104]. Далее в данном разделе представлен перечень используемых моделей для решения задач ОВОС аварийного выброса на ХОО.

Модель 1. Предназначена для прогнозирования концентрации ЗВ (вдоль оси ветра с учетом динамики распространения этого вещества) в определенной точке местности на один заданный момент времени (**модель 1.1**). Схема модели для этого случая представлена на рис. 2.16. Кроме того, данная модель может быть положена в основу для прогнозирования концентрации вещества (вдоль оси ветра с учетом динамики распространения этого вещества) в определенной точке в несколько последовательно взятых моментов времени (**модель 1.2**) (рис. 2.17).

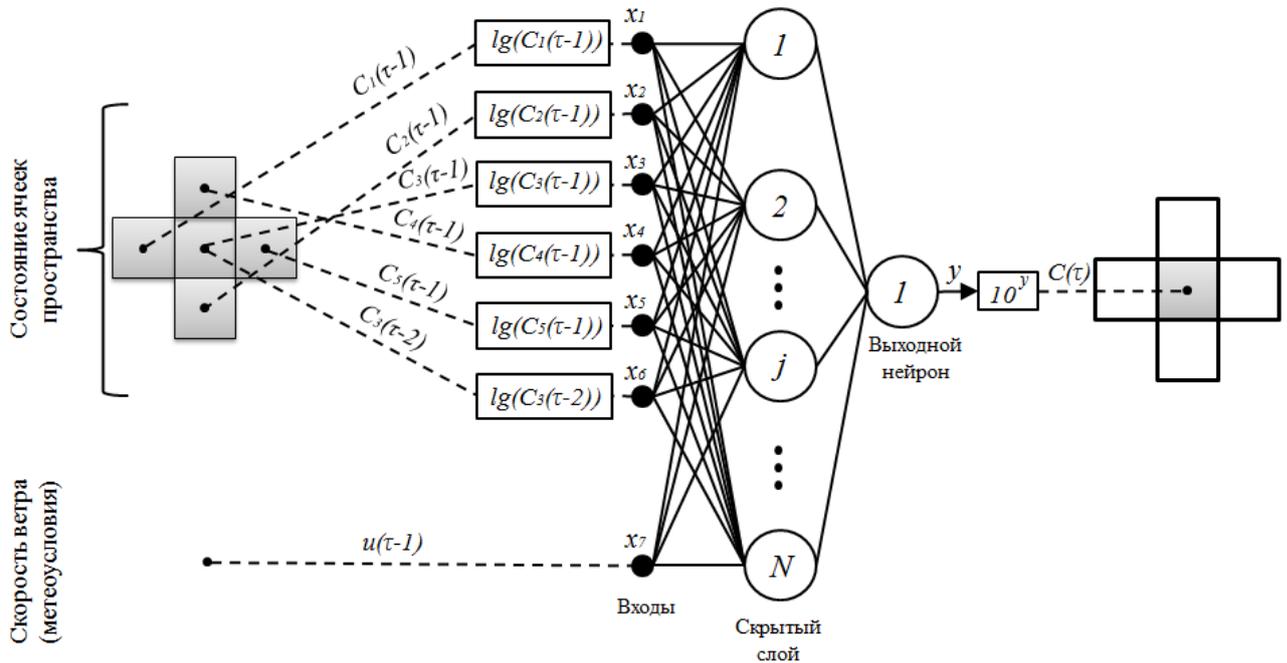


Рис. 2.16. Схема ячеечно-нейросетевой модели для прогнозирования концентрации в точке на один заданный момент времени с учетом динамики распространения загрязняющего вещества

Входными переменными для модели 1 являются:

- состояние ячеек окрестности (концентрация ЗВ) в момент времени $\tau - 1$, предшествующий прогнозируемому – $C_i(\tau - 1) \forall i \in [1, 5]$, кг/м³ (нумерация ячеек здесь и далее в соответствии с рис. 2.15);
- состояние центральной ячейки окрестности в момент времени $\tau - 2$ (два предшествующих дискретных момента времени назад) – $C_3(\tau - 2)$, кг/м³;
- параметры ОС (метеоусловия) в предшествующий дискретный момент времени $\tau - 1$:
- скорость ветра – $u(\tau - 1)$, м/с.

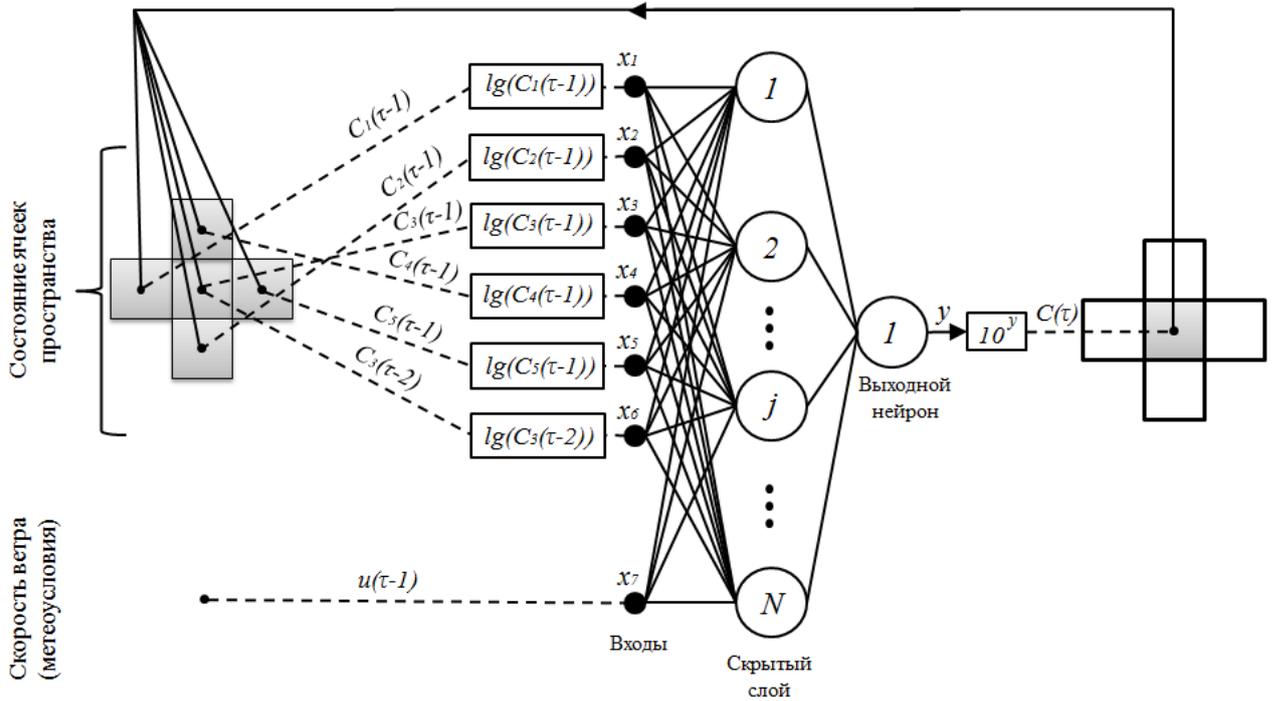


Рис. 2.17. Схема ячеечно-нейросетевой модели для прогнозирования концентрации в точке на несколько заданных моментов времени с учетом динамики распространения загрязняющего вещества

Природа используемых входных переменных требует их предварительного масштабирования. Большой разброс и неравномерное распределение значений входных и выходных концентраций в имеющемся диапазоне изменения вынуждает применять их предварительное логарифмирование.

Единственной выходной переменной моделей 1.1 и 1.2 является значение прогнозируемой концентрации ЗВ в момент времени τ .

Для формирования временного профиля концентраций получаемое на выходе ИНС значение концентрации присваивается каждому из входных значений той же сети. Цикл повторяется до тех пор, пока не будет получено необходимое количество точек профиля концентрации.

Расчет масштабированных значений входных переменных ИНС (x_i) осуществляется с использованием соотношений системы (2.21):

$$\begin{cases} x_i = \lg(C_i(\tau - 1)) \forall i \in [1, 5]; \\ x_6 = \lg(C_3(\tau - 2)); \\ x_7 = u(\tau - 1). \end{cases} \quad (2.21)$$

Прогнозируемая концентрация вычисляется на основе единственного значения выхода ИНС (y) по соотношению (2.22):

$$C(\tau) = 10^y \quad (2.22)$$

Математическое соотношение для прогнозирования концентрации ЗВ в момент времени τ для моделей 1.1 и 1.2 записывается следующим образом

$$C(\tau) = f_1(\{C_i(\tau - 1) \forall i \in [1, 5]\}, C_3(\tau - 2), u(\tau - 1)) \quad (2.23)$$

В модели 1.2, как следует из схемы (рис. 2.17), принимается допущение, что в предшествующий дискретный момент времени все входные концентрации имеют одинаковое значение, равное значению концентрации, спрогнозированному для него. Таким образом, на дальнейший последовательный расчет новых значений концентрации наиболее существенное влияние оказывает разница между $C_3(\tau - 1)$ и $C_3(\tau - 2)$.

Структурно ИНС, используемые в моделях 1.1 и 1.2, могут включать один или два скрытых слоя. Для определения количества нейронов в них необходимо оценить ориентировочное число синаптических связей, настраиваемых в процессе обучения.

В случае сети с одним скрытым слоем, с учетом 7 входных и 1 выходной переменной, количество нейронов в скрытом слое примем равным 8. Тогда число синаптических коэффициентов с учетом коэффициентов смещения составит $(7 + 1) \cdot 8 + (8 + 1) \cdot 1 = 73$. В соответствии с правилом количество обучающих примеров для такой сети должно быть в 2 – 5 раз больше числа настраиваемых весов, то есть 146 – 365 примеров.

В случае сети с двумя скрытыми слоями примем количество нейронов в них равными 6 и 3. Тогда число синаптических коэффициентов составит $(7 + 1) \cdot 6 + (6 + 1) \cdot 3 + (3 + 1) \cdot 1 = 73$. Таким образом, требуемый объем обучающей выборки находится в диапазоне 146 – 365 примеров.

Модель 2. Предназначена для прогнозирования концентрации ЗВ (без учета динамики распространения этого вещества) в определенной точке местности на один заданный момент времени (**модель 2.1**). Схема модели для этого случая представлена на рис. 2.18. Кроме того, данная модель может быть положена в основу для прогнозирования концентрации ЗВ (без учета динамики распространения этого вещества) в определенной точке в несколько последовательно взятых моментов времени (**модель 2.2**) (рис. 2.19).

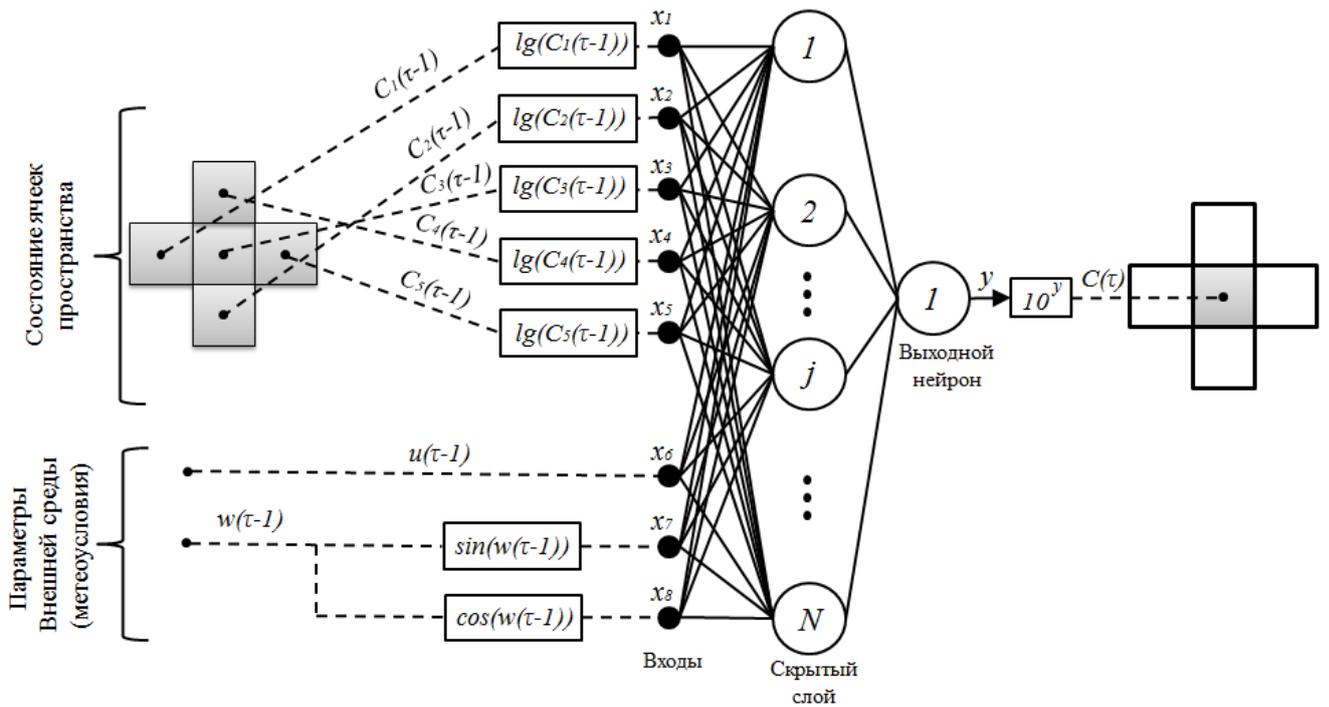


Рис. 2.18. Схема ячеечно-нейросетевой модели для прогнозирования концентрации в точке на один заданный момент времени без учета динамики распространения загрязняющего вещества

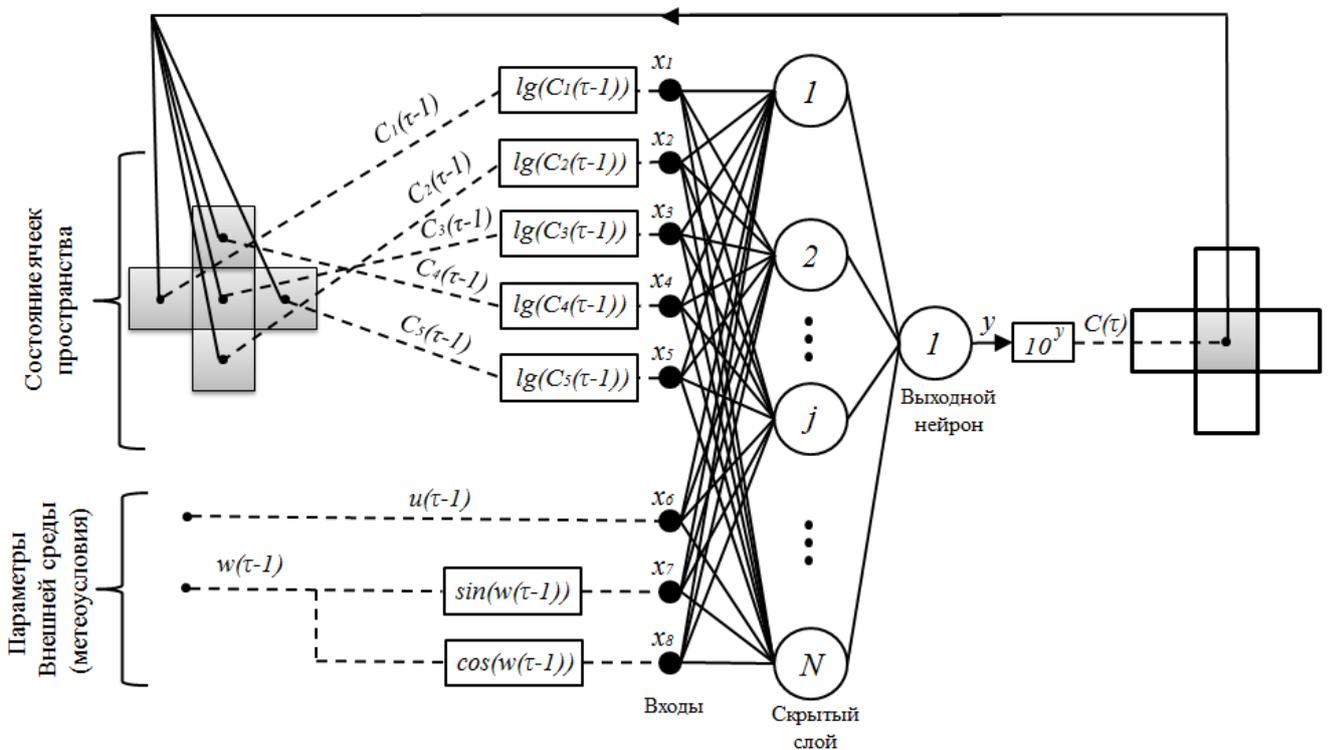


Рис. 2.19. Схема ячеечно-нейросетевой модели для прогнозирования концентрации в точке на несколько заданных моментов времени без учета динамики распространения загрязняющего вещества

Входными переменными данной модели являются:

- состояние ячеек окрестности (концентрация ЗВ) в момент времени $\tau - 1$, предшествующий прогнозируемому – $C_i(\tau - 1) \forall i \in [1, 5]$, кг/м³;
- состояние центральной ячейки окрестности в момент времени $\tau - 2$ (два предшествующих дискретных момента времени назад) – $C_3(\tau - 2)$, кг/м³;
- параметры ОС (метеоусловия) в предшествующий дискретный момент времени $\tau - 1$:
 - скорость ветра – $u(\tau - 1)$, м/с;
 - направление ветра – $w(\tau - 1)$, градусы.

Входные переменные масштабируются аналогично модели 1. Кроме того, так как направление ветра задается в градусах значениями от 0 до 359, необходимо учесть тот факт, что 0^0 и 359^0 – это практически одинаковое направление ветра. В этой связи принято решение разложить градусную меру направления ветра на две составляющие с использованием тригонометрических функций: $\sin(w)$, $\cos(w)$.

Единственной выходной переменной моделей 2.1 и 2.2 является значение прогнозируемой концентрации ЗВ в момент времени τ .

Для формирования временного профиля концентраций получаемое на выходе ИНС значение концентрации присваивается каждому из входных значений той же сети. Цикл повторяется до тех пор, пока не будет получено необходимое количество точек профиля концентрации.

Расчет масштабированных значений входных переменных ИНС (x_i) осуществляется с использованием соотношений системы (2.24):

$$\left\{ \begin{array}{l} x_i = \lg(C_i(\tau - 1)) \forall i \in [1, 5]; \\ x_6 = \lg(C_3(\tau - 2)); \\ x_7 = u(\tau - 1); \\ x_8 = \sin(w(\tau - 1)); \\ x_9 = \cos(w(\tau - 1)). \end{array} \right. \quad (2.24)$$

Прогнозируемая концентрация вычисляется аналогично модели 1 по соотношению (2.25). Математически соотношение для прогнозирования концентрации ЗВ в момент времени τ для моделей 2.1 и 2.2 записывается следующем образом:

$$C(\tau) = f_2(\{C_i(\tau - 1) \forall i \in [1, 5]\}, C_3(\tau - 2), u(\tau - 1), w(\tau - 1)) \quad (2.25)$$

В модели 2.2, как следует из схемы (рис. 2.19), принимается допущение, что в предшествующий дискретный момент времени все входные концентрации имеют одинаковое значение, равное значению концентрации, спрогнозированному для него. Таким образом, на дальнейший последовательный расчет новых значений

концентрации наиболее существенное влияние оказывает разница между $C_3(\tau - 1)$ и $C_3(\tau - 2)$.

Структурно ИНС, используемые в моделях 2.1 и 2.2, могут включать один или два скрытых слоя. Для определения количества нейронов в них необходимо оценить ориентировочное число синаптических связей, настраиваемых в процессе обучения.

В случае сети с одним скрытым слоем, с учетом 8 входных и 1 выходной переменной, количество нейронов в скрытом слое примем равным 9. Тогда число синаптических коэффициентов с учетом коэффициентов смещения составит $(8 + 1) \cdot 9 + (9 + 1) \cdot 1 = 91$. В соответствии с правилом количество обучающих примеров для такой сети должно быть в 2 – 5 раз больше числа настраиваемых весов, то есть 182 – 455 примеров.

В случае сети с двумя скрытыми слоями примем количество нейронов в них равными 8 и 4. Тогда число синаптических коэффициентов составит $(8 + 1) \cdot 8 + (8 + 1) \cdot 4 + (4 + 1) \cdot 1 = 113$. Таким образом, требуемый объем обучающей выборки находится в диапазоне 226 – 565 примеров.

Модель 3. Предназначена для экстраполяции поля концентрации ЗВ (вдоль оси ветра с учетом динамики распространения этого вещества) в ячейках, смежных с ячейками выбранной окрестности на один заданный дискретный момент времени по известным значениям концентрации в ячейках окрестности в предшествующий момент времени. Схема расположения ячеек, для которых осуществляется экстраполяция концентрации, представлена на рис. 2.20.

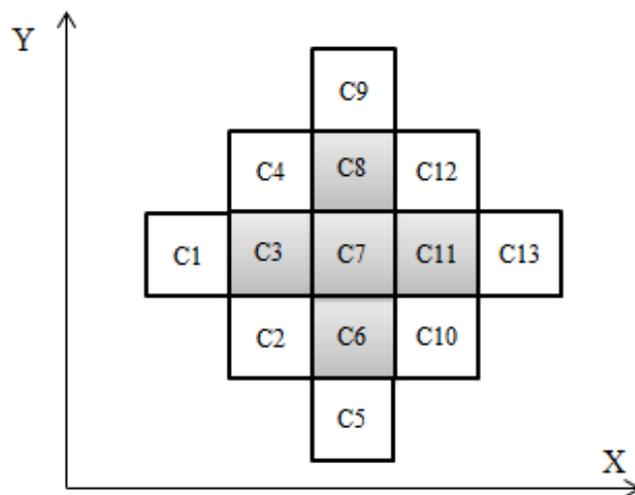


Рис. 2.20. Расположение смежных ячеек с окрестностью фон Неймана при экстраполяции поля концентрации

Смежные ячейки окрестности фон Неймана, показанные на рис. 2.20, разделим на две группы: дополняющие (угловые) и расширяющие.

Дополняющие (угловые) ячейки (C_2, C_4, C_{10}, C_{12}) – это набор ячеек, необходимый для дополнения окрестности фон Неймана до окрестности Мура. Таким образом, это ячейки, расположенные в углах окрестности Мура.

Расширяющие ячейки (C_1, C_5, C_9, C_{13}) – это ячейки, смежные с ячейками исходной окрестности и имеющие одну из координат, совпадающую с соответствующей координатой центральной ячейки исходной окрестности.

Для экстраполяции в угловых ячейках используется ЯНМ, схема которой представлена на рис. 2.21 (**модель 3.1**), а для экстраполяции в расширяющих ячейках – модель, схема которой представлена на рис. 2.22 (**модель 3.2**).

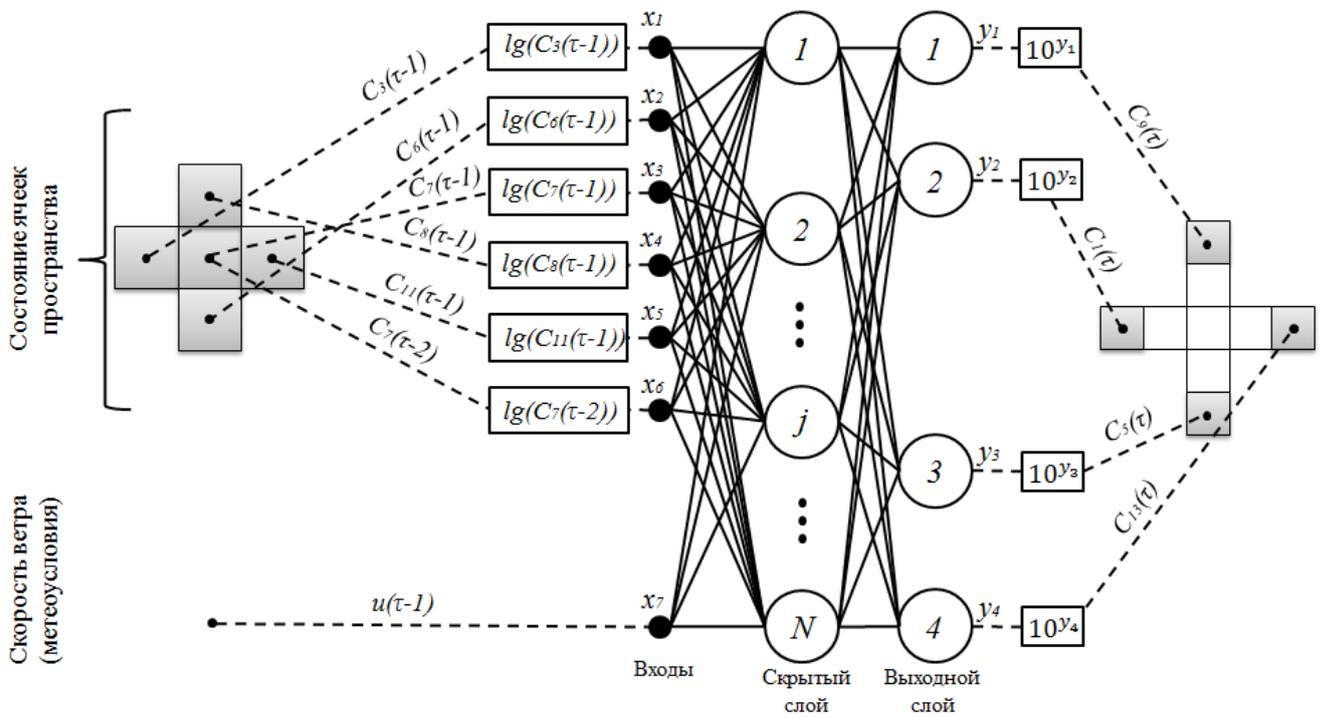


Рис. 2.21. Схема ячеечно-нейросетевой модели для экстраполяции в расширяющих ячейках с учетом динамики распространения загрязняющего вещества

Состав входных переменных модели 3.1 и 3.2 и способы их масштабирования аналогичны использованным в моделях 1.1 и 1.2.

Выходные переменные соответствуют прогнозируемым значениям концентрации ЗВ в смежных ячейках окрестности в дискретный момент времени τ :

- для модели 3.1: $C_j(\tau) \forall j \in \{2, 4, 10, 12\}$;
- для модели 3.2: $C_j(\tau) \forall j \in \{1, 5, 9, 13\}$.

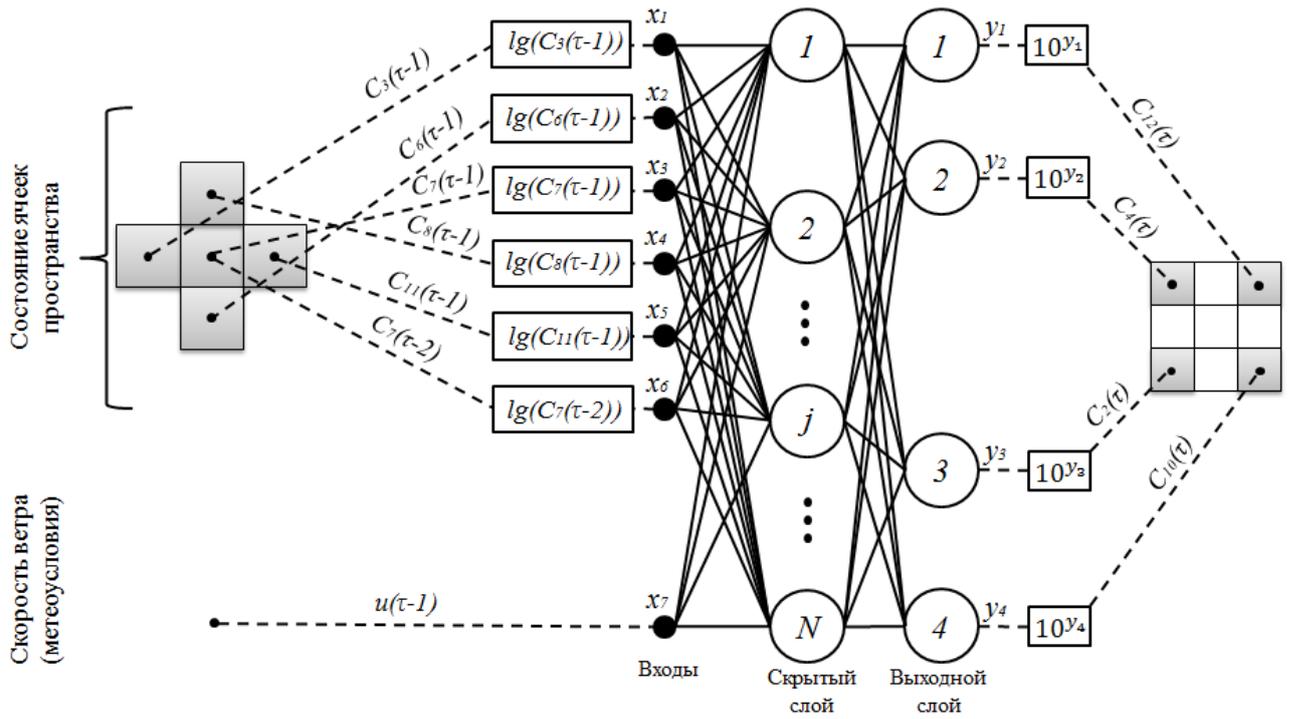


Рис. 2.22. Схема ячеечно-нейросетевой модели для экстраполяции в угловых ячейках с учетом динамики распространения загрязняющего вещества

Расчет масштабированных значений входных переменных моделей 3.1 и 3.2 (x_i) осуществляется с использованием соотношений системы (2.21). Прогнозируемые значения концентрации вычисляются на основе выходов ИНС y_j по соотношениям (2.26) и (2.27):

– для модели 3.1: $\{C_2, C_4, C_{10}, C_{12}\} = 10^{y_j} \forall j \in [1, 4];$ (2.26)

– для модели 3.2: $\{C_1, C_5, C_9, C_{13}\} = 10^{y_j} \forall j \in [1, 4].$ (2.27)

Математическое соотношение для прогнозирования значений концентрации ЗВ в момент времени τ для моделей 3.1 и 3.2 записывается следующим образом:

– для модели 3.1:
 $\{C_j(\tau) \forall j \in \{1, 5, 9, 13\}\} = f_{3.1}(\{C_i(\tau-1) \forall i \in \{3, 6, 7, 8, 11\}\}, C_7(\tau-2), u(\tau-1))$ (2.28)

– для модели 3.2:
 $\{C_j(\tau) \forall j \in \{1, 5, 9, 13\}\} = f_{3.2}(\{C_i(\tau-1) \forall i \in \{3, 6, 7, 8, 11\}\}, C_7(\tau-2), u(\tau-1))$ (2.29)

Аналогично моделям 1 и 2 ИНС, используемые в моделях 3.1 и 3.2, могут включать один или два скрытых слоя.

В случае сети с одним скрытым слоем, с учетом 7 входных и 4 выходных переменных, количество нейронов в скрытом слое примем равным 11. Тогда число синаптических коэффициентов составит $(7 + 1) \cdot 11 + (11 + 1) \cdot 4 = 136$. В соответствии с правилом количество обучающих примеров для такой сети должно быть

в 2 – 5 раз больше числа настраиваемых весов, то есть 272 – 680 примеров.

В случае сети с двумя скрытыми слоями примем количество нейронов в них равными 7 и 4. Тогда число синаптических коэффициентов составит $(7 + 1) \cdot 7 + (7 + 1) \cdot 4 + (4 + 1) \cdot 4 = 108$. Таким образом, требуемый объем обучающей выборки находится в диапазоне 216 – 540 примеров.

Модель 4. Предназначена для экстраполяции поля концентрации ЗВ (без учета динамики распространения этого вещества) в ячейках, смежных с ячейками выбранной окрестности на один заданный дискретный момент времени по известным значениям концентрации в ячейках окрестности в предшествующий момент времени. Схема расположения ячеек аналогична модели 3 и представлена на рис. 2.20.

Для экстраполяции в угловых ячейках используется ЯНМ схема которой представлена на рис. 2.23 (**модель 4.1**), а для экстраполяции в расширяющихся ячейках – модель, схема которой представлена на рис. 2.24 (**модель 4.2**).

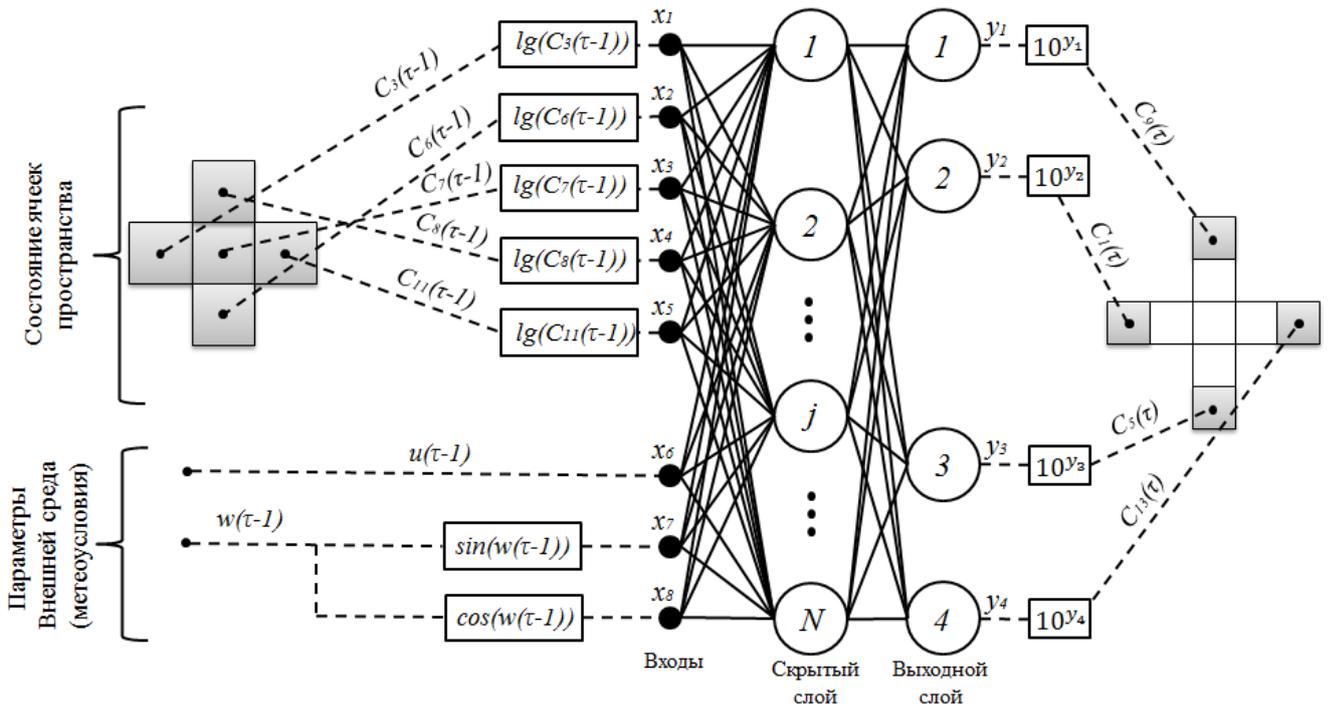


Рис. 2.23. Схема ячейочно-нейросетевой модели для экстраполяции в расширяющихся ячейках без учета динамики распространения загрязняющего вещества

Состав входных переменных модели 4.1 и 4.2 и способы их масштабирования аналогичны использованным в моделях 2.1 и 2.2.

Выходные переменные моделей 4.1 и 4.2 аналогичны выходным переменным моделей 3.1 и 3.2 соответственно.

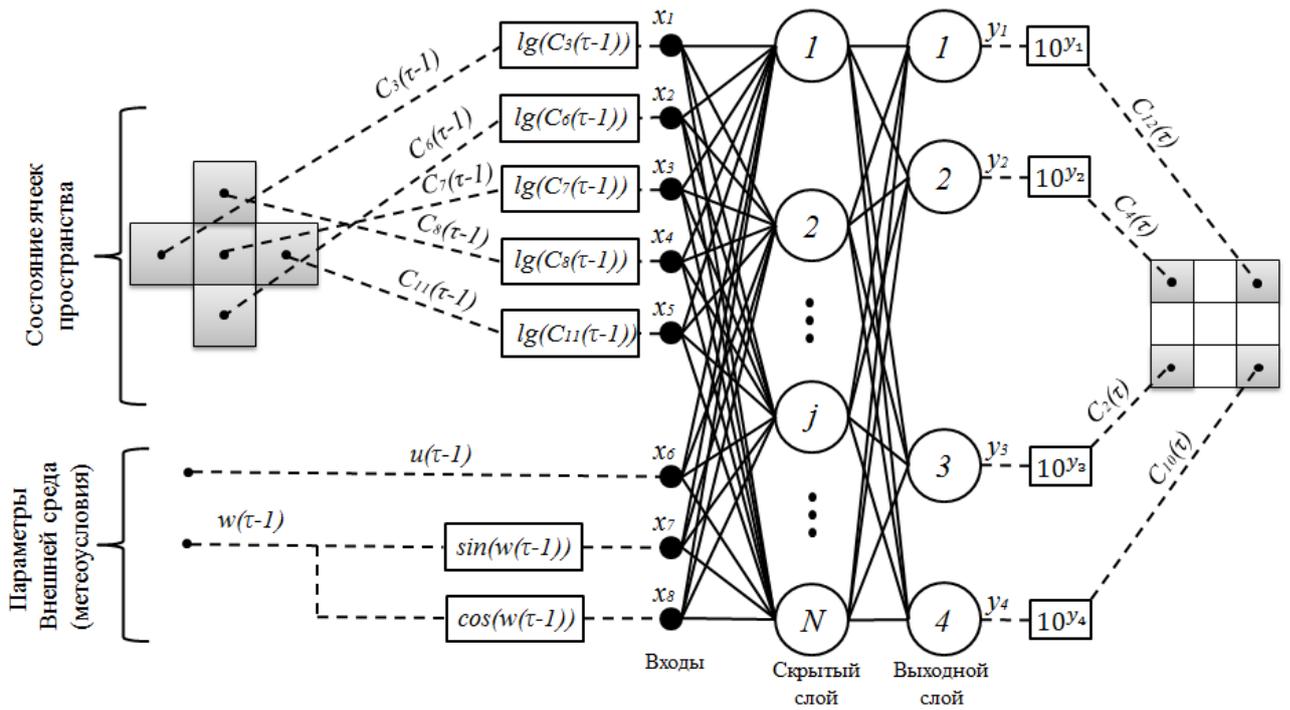


Рис. 2.24. Схема ячеечно-нейросетевой модели для экстраполяции в угловых ячейках без учета динамики распространения загрязняющего вещества

Расчет масштабированных значений входных переменных моделей 4.1 и 4.2 (x_i) осуществляется с использованием соотношений системы (2.24). Прогнозируемые значения концентрации вычисляются на основе выходов ИНС y_j по соотношениям (2.26) и (2.27).

Математическое соотношение для прогнозирования значений концентрации ЗВ в момент времени τ для моделей 4.1 и 4.2 записывается следующем образом:

– для модели 4.1:

$$\{C_j(\tau) \forall j \in \{1, 5, 9, 13\}\} = f_{4.1}(\{C_i(\tau - 1) \forall i \in \{3, 6, 7, 8, 11\}\}, C_7(\tau - 2), u(\tau - 1), w(\tau - 1)) \quad (2.30)$$

– для модели 4.2:

$$\{C_j(\tau) \forall j \in \{1, 5, 9, 13\}\} = f_{4.2}(\{C_i(\tau - 1) \forall i \in \{3, 6, 7, 8, 11\}\}, C_7(\tau - 2), u(\tau - 1), w(\tau - 1)) \quad (2.31)$$

Модели 4.1 и 4.2 могут включать один или два скрытых слоя.

В случае сети с одним скрытым слоем, с учетом 8 входных и 4 выходных переменных, количество нейронов в скрытом слое примем равным 12. Тогда число синаптических коэффициентов составит $(8 + 1) \cdot 12 + (12 + 1) \cdot 4 = 160$. В соответствии с правилом количество обучающих примеров для такой сети должно быть в 2 – 5 раз больше числа настраиваемых весов, то есть 320 – 800 примеров.

В случае сети с двумя скрытыми слоями примем количество нейронов в них равными 8 и 4. Тогда число синаптических коэффициентов составит $(8 + 1) \cdot 8 +$

$(8 + 1) \cdot 4 + (4 + 1) \cdot 4 = 128$. Таким образом, требуемый объем обучающей выборки находится в диапазоне 256 – 640 примеров.

Модель 5. Предназначена для прогнозирования поля концентрации ЗВ (вдоль оси ветра с учетом динамики распространения этого вещества) в окрестности на один заданный момент времени (**модель 5.1**). Схема модели для этого случая представлена на рис. 2.25. Кроме того, данная модель может быть использована для прогнозирования поля концентрации ЗВ (вдоль оси ветра с учетом динамики распространения этого вещества) в окрестности в несколько последовательно взятых моментов времени (**модель 5.2**) (рис. 2.26).

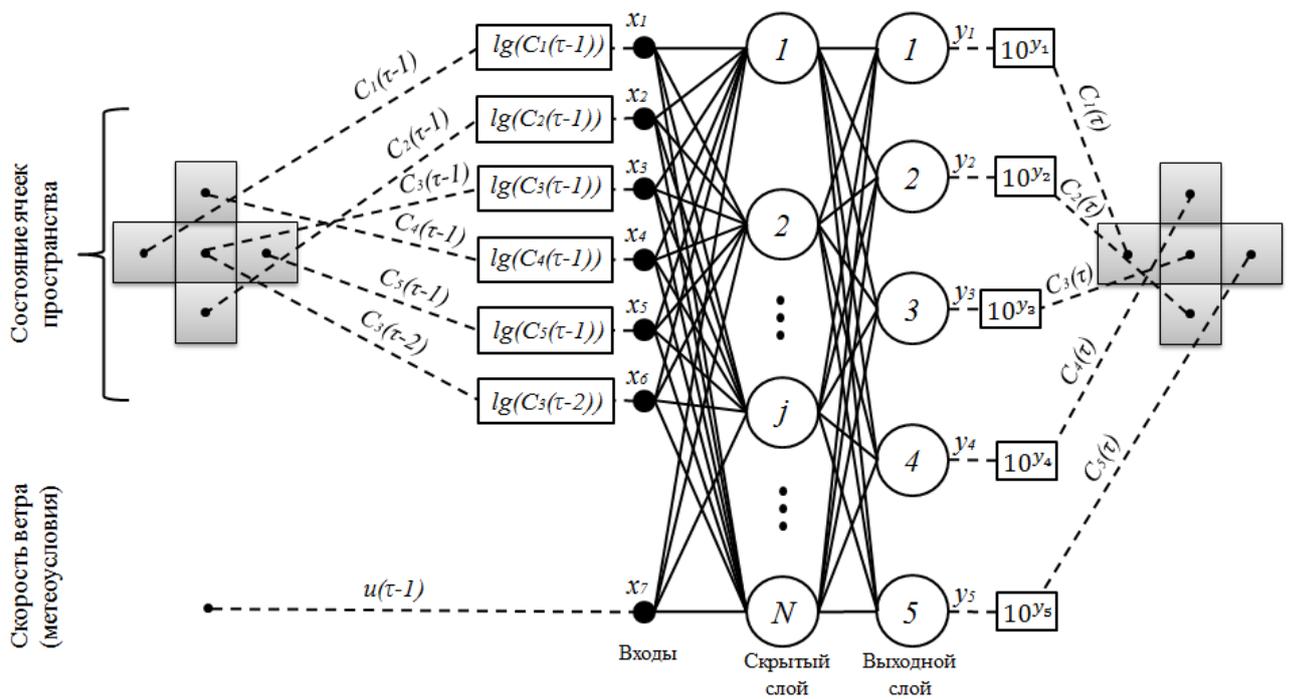


Рис. 2.25. Схема ячеечно-нейросетевой модели для прогнозирования поля концентрации в окрестности на один заданный момент времени с учетом динамики распространения загрязняющего вещества

Состав входных переменных моделей 5.1 и 5.2 и способы их масштабирования аналогичны использованным в моделях 1.1 и 1.2.

Выходные переменные соответствуют прогнозируемым значениям концентраций ЗВ в ячейках окрестности в дискретный момент времени τ – $C_j(\tau) \forall j \in [1, 5]$.

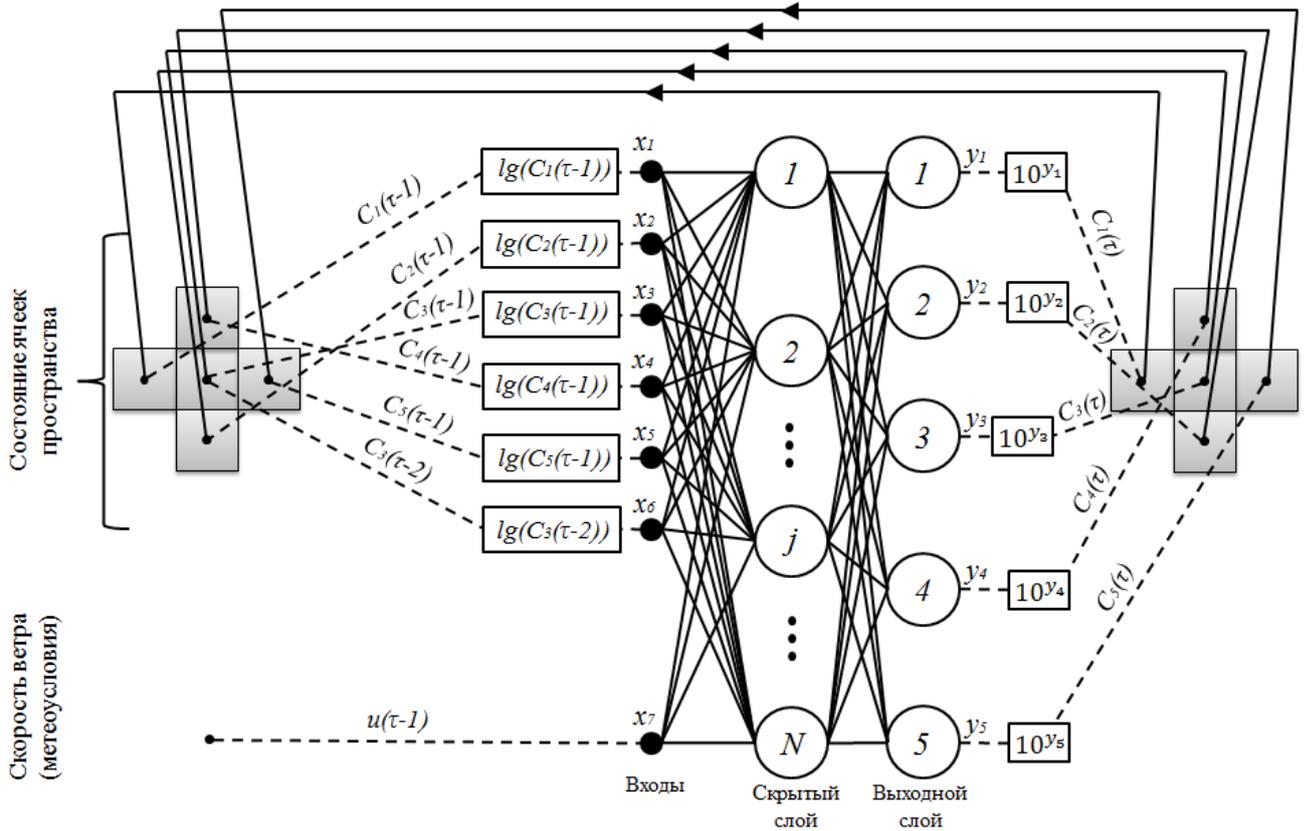


Рис. 2.26. Схема ячеечно-нейросетевой модели для прогнозирования поля концентрации в окрестности на несколько заданных моментов времени с учетом динамики распространения загрязняющего вещества

Для формирования временных профилей концентрации в ячейках окрестности получаемые на выходе ИНС значения присваиваются соответствующим входным значениям той же сети, как показано на рис. 2.26. Цикл повторяется до тех пор, пока не будет получено необходимое количество точек профилей концентрации.

Расчет масштабированных значений входных переменных моделей 5.1 и 5.2 x_i осуществляется с использованием соотношений системы (2.21). Прогнозируемые значения концентрации вычисляются на основе выходов ИНС y_j по соотношению (2.32):

$$C_j(\tau) = 10^{y_j} \forall j \in [1, 5] \tag{2.32}$$

Математически соотношение для прогнозирования значений концентрации ЗВ в ячейках окрестности в момент времени τ для моделей 2.1 и 2.2 записывается следующим образом:

$$\{C_j(\tau) \forall j \in [1, 5]\} = f_2(\{C_i(\tau - 1) \forall i \in [1, 5]\}, C_3(\tau - 2), u(\tau - 1)) \tag{2.33}$$

В ряде случаев в модели 2.2 может применяться способ закливания переменных, аналогичный модели 1.2, то есть. подачей на входы $C_j(\tau) \forall j \in [1, 5]$ одного

и того же значения $C_3(\tau - 1)$. Это позволяет избежать накопления ошибки, возникающей в отдельно взятых ячейках окрестности. Очевидно, что данное допущение тоже вносит свою погрешность, однако опыт использования данных нейросетевых моделей [53] показал, что такая погрешность значительно меньше во многих случаях.

Структурно ИНС, используемые в моделях 2.1 и 2.2, могут включать один или два скрытых слоя. Ориентировочное количество нейронов в них оценивается аналогично моделям 1.1 и 1.2.

В случае сети с одним скрытым слоем, с учетом 7 входных и 5 выходных переменных, количество нейронов в скрытом слое примем равным 12. Тогда число синаптических коэффициентов составит $(7 + 1) \cdot 12 + (12 + 1) \cdot 5 = 161$. В соответствии с правилом количество обучающих примеров для такой сети должно быть в 2 – 5 раз больше числа настраиваемых весов, то есть 322 – 805 примеров.

В случае сети с двумя скрытыми слоями примем количество нейронов в них равными 7 и 5. Тогда число синаптических коэффициентов составит $(7 + 1) \cdot 7 + (7 + 1) \cdot 5 + (5 + 1) \cdot 5 = 126$. Таким образом, требуемый объем обучающей выборки находится в диапазоне 252 – 630 примеров.

Основные параметры всех моделей представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2

Основные параметры ячеечно-нейросетевых моделей

| № модели | Назначение | Количество входных переменных | | Количество выходных переменных | | Допустимый объем обучающей выборки | |
|----------|---|-------------------------------|-----|--------------------------------|-----|------------------------------------|------------------|
| | | Модели | ИНС | Модели | ИНС | Один скрытый слой | Два скрытых слоя |
| 1.1 | Прогнозирование концентрации загрязняющего вещества в определенной точке местности на один заданный момент времени (с учетом динамики) | 7 | 7 | 1 | 1 | 146-365 | 146-365 |
| 1.2 | Прогнозирование концентрации вещества в определенной точки местности в несколько последовательно взятых моментов времени (с учетом динамики) | 7 | 7 | 1 | 1 | 146-365 | 146-365 |
| 2.1 | Прогнозирование концентрации загрязняющего вещества в определенной точке местности на один заданный момент времени (без учета динамики) | 7 | 8 | 1 | 1 | 182-455 | 226-565 |
| 2.2 | Прогнозирование концентрации вещества в определенной точки местности в несколько последовательно взятых моментов времени (без учета динамики) | 7 | 8 | 1 | 1 | 182-455 | 226-565 |
| 3.1 | Экстраполяция поля концентрации загрязняющего вещества в угловых ячейках в текущий момент времени по известным значениям концентрации в ячейках окрестности (с учетом динамики) | 7 | 7 | 4 | 4 | 272-680 | 216-540 |

| № модели | Назначение | Количество входных переменных | | Количество выходных переменных | | Допустимый объем обучающей выборки | |
|----------|--|-------------------------------|-----|--------------------------------|-----|------------------------------------|------------------|
| | | Модели | ИНС | Модели | ИНС | Один скрытый слой | Два скрытых слоя |
| 3.2 | Экстраполяция поля концентрации загрязняющего вещества в расширяющихся ячейках в текущий момент времени по известным значениям концентрации в ячейках окрестности (с учетом динамики) | 7 | 7 | 4 | 4 | 272-680 | 216-540 |
| 4.1 | Экстраполяция поля концентрации загрязняющего вещества в угловых ячейках в текущий момент времени по известным значениям концентрации в ячейках окрестности (без учета динамики) | 7 | 8 | 4 | 4 | 320-800 | 254-640 |
| 4.2 | Экстраполяция поля концентрации загрязняющего вещества в расширяющихся ячейках в текущий момент времени по известным значениям концентрации в ячейках окрестности (без учета динамики) | 7 | 8 | 4 | 4 | 320-800 | 254-640 |
| 5.1 | Прогнозирование поля концентрации загрязняющего вещества в окрестности на один заданный момент времени (с учетом динамики) | 7 | 7 | 5 | 5 | 322-805 | 252-630 |
| 5.2 | Прогнозирование поля концентрации загрязняющего вещества в окрестности в несколько последовательно взятых моментов времени (с учетом динамики) | 7 | 7 | 5 | 5 | 322-805 | 252-630 |

2.4. Методика системного анализа и обработки исходной выборки при ячеечно-нейросетевом моделировании последствий аварийного загрязнения атмосферы

Предварительная обработка выборок

Качество работы ИНС сильно зависит от предъявляемого в процессе обучения набора учебных данных. Они должны быть типичными для задачи, решению которой обучается сеть. Обучающий набор данных представляет собой множество экспериментальных векторов, состоящих из значений входных и выходных переменных.

В процессе обработки исходной выборки данные, используемые для обучения ИНС, на первом этапе разделяются на две категории: одни данные используются для обучения (настройка весовых коэффициентов), а другие – для тестирования. В соответствии с правилом количество обучающих примеров должно быть в 2 – 5 раз больше числа настраиваемых весов. Количество примеров для тестирования сети подбирается так, чтобы в ходе процесса тестирования можно было бы оценить способность сети обобщать полученные знания. При большом объеме обучающего набора данных тестовая выборка должна составлять 5 – 7 % от него. При малом объеме (до нескольких сотен примеров) она может достигать 20 %. Обобщение знаний в процессе обучения означает способность сети правильно выполнять поставленную задачу с данными, которые оказываются хоть и аналогичными данным, использовавшимся в процессе обучения ИНС, но все же отличными от них [101].

Следующий (второй) этап обработки исходной выборки – это нормирование (нормализация) и масштабирование данных. Масштабирование входных данных применяется для более равномерного распределения примеров по ОДЗ переменных, что в свою очередь сказывается на более качественной работе ИНС. В данной диссертационной работе используются следующие методы масштабирования:

- логарифмирование входных данных с использованием натурального или десятичного логарифма;
- с использованием тригонометрической функции синуса (косинуса) угла.

Градусную меру угла направления ветра необходимо масштабировать с использованием ее разложения на две составляющие: синус и косинус угла. Это связано с тем, что направление ветра, например, 1° и 359° практически идентичны, а разница между числами высока. При разложении этих углов направления ветра на

синус и косинус угла будут небольшие отличия только в этих двух значениях, что более корректно для обучения ИНС.

После масштабирования необходимо нормировать входные данные. Нормирование данных делается для того, чтобы привести все переменные выборки к единой ОДЗ. Возможны следующие варианты нормирования данных по ОДЗ:

- с диапазоном изменения от 0 до 1;
- с диапазоном изменения от -1 до 1.

Возможны следующие способы нормирования:

- линейное:

а) при ОДЗ от 0 до 1:

$$\tilde{x} = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (2.34)$$

б) при ОДЗ от -1 до 1:

$$\tilde{x} = 2 \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} - 1 \quad (2.35)$$

- нелинейное с использованием сигмоидальной функции:

а) при ОДЗ от 0 до 1:

$$\tilde{x} = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (2.36)$$

б) при ОДЗ от -1 до 1:

$$\tilde{x} = \frac{2}{1 + e^{-x}} - 1 \quad (2.37)$$

Для каждого набора входных данных нормирование ведется независимо от других, то есть максимальное и минимальное значения выбираются индивидуально для каждого входа. При необходимости минимальное и (или) максимальное значение для некоторых переменных могут задаваться пользователем, а не выбираться программой автоматически. Также возможна работа с обучающей выборкой без предварительного нормирования данных, однако такая возможность требуется крайне редко.

На третьем этапе обработки исходной выборки осуществляется анализ входящих в нее примеров:

- исключаются противоречивые примеры. Если таких примеров несколько, поступают в соответствии с одним из следующих вариантов:
 - из выборки исключают все примеры, имеющие одинаковый вектор входных переменных, если хотя бы у двух из них обнаруживается один или несколько отличающихся элементов вектора входных переменных;
 - в выборке оставляют единственный из группы противоречивых

- примеров, если он встречается наибольшее количество раз по сравнению с остальными;
- формируется единственный пример, оставляемый в выборке, таким образом, чтобы каждый элемент выходного вектора повторялся наибольшее количество раз в исходной группе противоречивых примеров;
 - формируется единственный пример, оставляемый в выборке, каждый элемент выходного вектора которого есть среднее арифметическое соответствующих элементов в исходной группе противоречивых элементов (при наличии большого количества примеров расчет среднего арифметического можно предварить отбрасыванием одного-двух наибольших и наименьших значений);
 - исключаются примеры с нулевым входным вектором, так как в процессе обучения по алгоритму обратного распространения ошибки, они не позволяют рассчитать значение поправки весовых коэффициентов;
 - исключаются повторяющиеся примеры (в выборке остается только один);
 - проверяется распределение примеров по диапазону изменения входных переменных, при необходимости выборка дополняется недостающими данными или исключаются избыточные примеры.

Основной целью распределения примеров по диапазону изменения входных переменных является анализ репрезентативности обучающей выборки. Также в дополнение к проверке адекватности можно использовать данную оценку при практическом применении или тестировании. То есть, если пример попадает в диапазоны низкого значения репрезентативности, то и доверять результатам можно в меньшей степени.

Для распределения примеров по диапазонам изменения входных переменных выполняется следующая последовательность действий:

1. Определяются границы диапазона (X_{min} и X_{max}) – для нормированных данных обычно $[0, 1]$ или $[-1, 1]$;
2. Выбирается количество поддиапазонов (N_{sd});
3. Определяется длина поддиапазона (L) и граница i -го поддиапазона $[x_i^{Left}, x_i^{Right}]$:

$$L = \frac{X_{max} - X_{min}}{N_{sd}} \quad (2.38)$$

$$x_i^{Left} = X_{min} + L \cdot (i - 1) \quad (2.39)$$

$$x_i^{Right} = X_{min} + L \cdot i \quad (2.40)$$

4. Определяется количество примеров выборки (обучающей, тестовой, всего), попавших в каждый поддиапазон (N_i) по выбранной переменной. Аналогичную процедуру можно выполнить по любой другой входной переменной;
5. Делается оценка и дается заключение об уровне репрезентативности диапазонов:

- 5.1. Устанавливается уровень допустимого отклонения от равномерного распределения (d) (обычно 10 – 20 %);

- 5.2. Рассчитывается среднее количество примеров в диапазоне:

$$N_{cp} = \frac{N}{N_{sd}} \quad (2.41)$$

где N - общее количество примеров выборки;

- 5.3. Рассчитывается показатель распределения примеров в каждом диапазоне:

$$D_i = \frac{N_i}{N_{cp}} \quad (2.42)$$

Характеристики категорий значений показателя распределения и соответствующие им рекомендации по работе с выборками данных представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3

Характеристики категорий значений показателя распределения

| Категория значений показателя распределения | Диапазон изменения D_i | Характеристика категории |
|---|-----------------------------|--|
| 1 | $D_i < (1-d)$ | Поддиапазон описан недостаточно полно по сравнению с другими. Целесообразно дополнить выборку новыми примерами |
| 2 | $(1-d) \leq D_i \leq (1+d)$ | Поддиапазон описан достаточно полно |
| 3 | $D_i > (1+d)$ | Имеется избыток примеров выборки для данного диапазона. Целесообразно исключить часть примеров |

Для выборок больших размеров, насчитывающих тысячи, десятки и сотни тысяч примеров, исключение повторяющихся и противоречивых примеров с целью уменьшения размера обучающей выборки и, как следствие, ускорения самого процесса обучения, не всегда подтверждает свою эффективность [105]. Связано это с тем, что для небольших выборок почти всегда можно подобрать достаточно простую структуру ИНС и осуществить процесс ее обучения за приемлемый интервал времени таким образом, что она, если не обучится обобщать все возможные вход-

ные наборы с выдачей правильного отклика, то, по крайней мере, запомнит обучающие данные. Для больших же выборок, требующих к тому же более сложных структур ИНС, временной фактор, обусловленный огромным объемом вычислений, вступает в противоречие с достижением достаточного уровня ошибки обучения. И если для выборок размера в несколько тысяч примеров можно найти определенный баланс между временем обучения и уровнем ошибки, то в случаях, когда размер выборки достигает десятков и сотен тысяч примеров, не помогает даже распараллеливание вычислительных процедур.

В ряде случаев большие выборки содержат большое количество повторов, обусловленных частотой, с которой во время реального процесса или явления встречаются различные комбинации входных переменных. Исключение повторяющихся примеров, безусловно, способствует уменьшению размера выборки и увеличению количества эпох обучения в единицу времени. Как следствие большего количества итераций подстройки весовых коэффициентов, ошибка обучения также может быть значительно уменьшена. Однако общий размер выборки остается достаточно большим, чтобы не позволить реализовать процесс обучения одинаково хорошо для всех примеров в условиях ограниченного разумными рамками времени. В этой связи часть примеров выборки решается с ошибками, причем вероятность ошибки одинакова как для редко встречавшихся в исходной выборке примеров, так и для часто встречавшихся в ней.

Все это приводит к тому, что на этапе практического использования достаточно хорошо обученная ИНС будет значительно чаще давать неправильный отклик и, как результат, большую ошибку. Причина этого кроется именно в различной частоте использования одних и тех же примеров на этапах обучения и практического использования: при обучении – одинаково часто, на практике – с различной частотой.

Данную проблему можно решить за счет использования четырех дополнительных мер на разных этапах стадии настройки и обучения жизненного цикла ИНС:

- изменения этапа анализа повторяемости примеров в массиве обучающих данных;
- модификации структуры обучающей выборки;
- изменения алгоритма обучения;
- коррекции критерия обучения.

Анализ обучающих данных на наличие повторов остается необходимым эта-

пом стадии настройки и обучения. Более того, происходит и существенное сокращение обучающей выборки, так как в ней все равно остаются только уникальные примеры. В то же время на данном этапе дополнительно рассчитывается количество копий N_k каждого примера с номером k . Зная общее количество примеров в исходной выборке $N_{об}$, определяется частота его присутствия в ней:

$$\varphi_k = N_k / N_{об} \quad (2.43)$$

Данная информация становится неотъемлемым атрибутом любого k -го примера выборки и далее должна быть использована в процессе обучения. Таким образом, помимо столбцов входных и выходных значений переменных новая выборка дополняется столбцом частот присутствия соответствующих примеров в исходном массиве обучающих данных.

Приведенный далее алгоритм обучения использует в работе модифицированную вышеописанным способом выборку:

1. Задаются настройки ИНС (количество слоев и нейронов в каждом слое, параметры активационных функций) и алгоритма обучения (предельно заданное количество тактов пересчета весовых коэффициентов (тактов обучения) и коэффициент скорости обучения).
2. Весовые коэффициенты нейронов инициализируются небольшими случайными значениями.
3. Выбирается случайный пример обучающей выборки: на первом такте – любой; на каждом следующем такте обучения с номером T – один из тех, для которых выполняется условие: $\psi_k \leq \varphi_k$, где ψ_k – частота использования k -го примера для коррекции весовых коэффициентов ИНС. Последняя характеристика рассчитывается по соотношению:

$$\psi_k = M_k / (T-1) \quad (2.44)$$

где M_k – количество раз использования k -го примера для обучения ИНС после $(T-1)$ тактов обучения.

4. Весовые коэффициенты нейронов изменяются с использованием корректирующих соотношений используемого метода обучения, как, например, в данной диссертационной работе – метода обратного распространения ошибки, описанного в п. 2.2.
5. Проверяется достижение предельно заданного количества тактов обучения. Если оно не достигнуто, алгоритм продолжает работу с п. 3, иначе – переход к п. 6.
6. Выполняется оценка качества обучения ИНС с использованием следующего выражения накопленной ошибки:

$$E = \sum_{k=1}^{N_{об}} \left[\frac{\varphi_k}{N_{вых}} \sum_{j=1}^{N_{вых}} |y_{kj}^п - y_{kj}^р| \right] \quad (2.45)$$

где $y_{kj}^п$ – значение результирующей переменной с номером j в обучающем примере с номером k ; $y_{kj}^р$ – значение результирующей переменной с номером j , рассчитанной по обученной ИНС для входного вектора обучающего примера с номером k ; $N_{вых}$ – количество выходных переменных. Ошибка E также может быть выражена в процентах, так как рассчитывается для выходных переменных, нормализованных в пределах $[0, 1]$.

Последнее расчетное соотношение отличается от аналогов учетом частоты φ_k , с которой k -й пример встречается во время моделируемого процесса или явления. Таким образом, производимая с его помощью оценка будет соответствовать существующей в действительности картине.

Следует заметить, что в данном алгоритме не используется традиционное обучение ИНС по эпохам – циклам однократного предъявления в случайном порядке всех примеров обучающей выборки [105].

Корреляционный анализ обучающих выборок

Методы корреляционного и регрессионного анализов широко применяются для выявления и описания зависимостей между случайными величинами по экспериментальным данным [106]. Они незаменимы в практике структурной идентификации математических моделей, в том числе ЯНМ. Для экспериментального изучения зависимости между случайными величинами X и Y производят некоторое количество (n) независимых опытов. Результат i -го опыта дает пару значений (x_i, y_i) , $i=1, 2, \dots, n$. В данной диссертационной работе корреляционный анализ используется для установления связи между всеми возможными парами входных и выходных переменных. Результаты этого анализа могут быть использованы при работе с ИС «ЯНСКА» для определения состава входных и выходных переменных, включаемых в ЯНМ.

О наличии или отсутствии корреляции между двумя случайными величинами качественно можно судить по виду поля корреляции, нанеся точки (x_i, y_i) на координатную плоскость. Для количественной оценки тесноты связи служит выборочный коэффициент корреляции.

Выборочный коэффициент корреляции получают по состоятельным и несмещенным оценкам для математических ожиданий, дисперсии и ковариации, то есть по выборочным средним (2.46 – 2.47), дисперсиям (2.48 – 2.49) и ковариации (2.50).

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.46)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (2.47)$$

$$s_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (2.48)$$

$$s_y^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (2.49)$$

$$cov_{xy}^* = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad (2.50)$$

Выборочный коэффициент корреляции:

$$r_{xy}^* = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{(n-1)s_x s_y} \quad (2.51)$$

Выборочный коэффициент корреляции r^* дает состоятельную, но смещенную оценку для коэффициента корреляции генеральной совокупности, эта оценка имеет смещение, равное $\frac{r(1-r^2)}{2n}$. Величина смещения убывает обратно пропорционально числу опытов n и при $n > 50$ составляет менее 1 %.

Выборочный коэффициент корреляции r_{xy}^* , так же как и r_{xy}^* – коэффициент корреляции генеральной совокупности, по абсолютной величине не превосходит единицы: $-1 \leq r_{xy}^* \leq 1$

Выборочный коэффициент корреляции не изменяется при изменении начала отчета и масштаба величин X и Y . Это свойство позволяет существенно упростить вычисления.

Коэффициент корреляции одинаково отмечает долю случайности и криволинейность связи между X и Y . Зависимость между X и Y может быть близкой к функциональной, но существенно не линейной, а коэффициент корреляции будет значительно меньше единицы.

При достаточно большом объеме выборки n выборочный коэффициент корреляции r^* приближенно равен генеральному коэффициенту r . Однако оценить возникшую при этом погрешность затруднительно. Для этого нужно знать распределение r^* как случайной величины. Это распределение зависит от генерального коэффициента r , который неизвестен. Для проверки гипотезы об отсутствии корреляции необходимо проверять, значимо ли отличается r^* от нуля. Для проверки нулевой гипотезы $H^0: r=0$ можно использовать нормальное распределение со стандартом:

$$\sigma_{r^*} \approx (1 - r^{*2})/\sqrt{n} \quad (2.52)$$

Если в качестве доверительной вероятности взять $\beta = 0,95$, коэффициент корреляции находится в следующих доверительных границах:

$$r^* - \frac{1,96(1-r^{*2})}{\sqrt{n}} \leq r \leq r^* + \frac{1,96(1-r^{*2})}{\sqrt{n}} \quad (2.53)$$

С вероятностью 0,95 можно утверждать, что зависимость между случайными величинами существует, если 0 не содержится внутри доверительного интервала, то есть если

$$|r^*| - \frac{1,96(1-r^{*2})}{\sqrt{n}} > 0 \quad (2.54)$$

Оценка адекватности ячеечно-нейросетевых моделей

Под адекватностью математической модели подразумевается способность данной модели отображать заданные свойства изучаемого сложного технического объекта с погрешностью не выше заданной. Причем, адекватность рассматривается только по определенным признакам (свойствам), которые являются основными в исследовании [57].

Оценка адекватности ЯНМ осуществляется для обучающей и тестовой выборок в отдельности с использованием критерия Фишера. Так как для составления выборок используется программный комплекс ТОКСИ+Risk [82], реализующий методику оценки последствий химических аварий [64], результат расчета по методике определяется однозначно для имеющегося набора входных переменных. Следовательно, в соответствии с [106] при отсутствии параллельных опытов коэффициент F определяется следующим образом:

$$F = \frac{S_{\text{ср}}^2}{S_{\text{ад}}^2} \quad (2.55)$$

Дисперсия относительно среднего:

$$S_{\text{ср}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^k (y_i^{\text{э}} - \bar{y}^{\text{э}})^2}{f_{\text{ср}}} \quad (2.56)$$

где $y_i^{\text{э}}$ – результаты, полученные в ходе вычислительного эксперимента; $\bar{y}^{\text{э}}$ – среднее значение для экспериментальных данных; k – число экспериментальных данных; $f_{\text{ср}}$ – число степеней свободы дисперсии относительно среднего.

$$f_{\text{ср}} = k - 1 \quad (2.57)$$

Дисперсия адекватности:

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^k (y_i^{\text{э}} - y_i^{\text{п}})^2}{f_{\text{ад}}} \quad (2.58)$$

где $y_i^{\text{п}}$ – результаты, полученные по нейросетевой модели; $f_{\text{ад}}$ – число степеней свободы дисперсии адекватности.

$$f_{\text{ад}} = k - n \quad (2.59)$$

где n – число параметров (входов) нейросетевой модели.

Критерий Фишера показывает, во сколько раз уменьшается рассеяние относительно полученного уравнения регрессии по сравнению с рассеянием относительно среднего. Чем больше значение F превышает табличное $F_{1-p}(f_{\text{ср}}, f_{\text{ад}})$ для выбранного уравнения значимости p и имеющихся чисел степеней свободы, тем эффективнее уравнение регрессии [106].

Полученная на основе критерия Фишера оценка адекватности нейросетевой модели для обучающей и тестовой выборок используется для дальнейшего принятия решений по работе с ЯНМ в целом. Возможные сочетания вариантов оценок и соответствующие им рекомендации приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4

**Принятие решений по результатам оценки адекватности
нейросетевой модели**

| Оценка адекватности модели по критерию Фишера | | Рекомендации | | | | | |
|---|----------------------|--------------|---|---|---|---|---|
| Для обучающей выборки | Для тестовой выборки | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Неадекватна | Неадекватна | + | | + | + | + | |
| Неадекватна | Адекватна | + | | + | + | + | |
| Адекватна | Неадекватна | | + | | + | | |
| Адекватна | Адекватна | | | | | | + |

Перечень рекомендаций из таблицы 2.4 приведен ниже:

1. Дополнение обучающей выборки новыми данными;
2. Дополнение тестовой выборки новыми данными;
3. Усложнение структуры ИНС за счет увеличения количества слоев и нейронов в слоях;
4. Изменение состава входных и выходных переменных, выбор другой окрестности ЯНМ;
5. Использование масштабирования входных переменных;
6. Практическое использование модели.

Как видно из таблицы 2.4, практическое использование модели допускается только при ее адекватности как по обучающей, так и по тестовой выборкам.

2.5. Выводы

Исследование различных научно-методических аспектов и постановок задач экологической безопасности химических производств и оценки последствий химических аварий позволяет сделать следующие выводы:

1. Решение любых задач экологической безопасности и, в частности, задач оценки последствий аварийного загрязнения атмосферы может быть эффективным только при обязательном использовании системного подхода и методов СА.
2. Изложена методология ячеечно-нейросетевого моделирования с ее адаптацией для решения задач оценки последствий загрязнения атмосферы в результате промышленного аварийного выброса.
3. Обоснован выбор метода ячеечно-нейросетевого моделирования для решения задач, связанных с распространением примеси ЗВ в атмосфере в условиях, связанных с неполнотой, неопределенностью и разнородностью исходной информации и сопутствующих внешних воздействий, оказывающих влияние на процесс.
4. Обоснован выбор многослойных перцептронов для описания переноса примеси между ячейками в ЯНМ. Показана достаточность используемого для обучения многослойных перцептронов алгоритма обратного распространения ошибки.
5. Сформулированы постановки задач ячеечно-нейросетевого моделирования для определения единичных концентраций, пространственных и временных концентрационных профилей, ЗЗ и токсического поражения для реализации в ИС «ЯНСКА».
6. Проведен сравнительный анализ реализованных в системе моделей. Сформулированы требования к объемам обучающих выборок в зависимости от количества скрытых слоев многослойных перцептронов.
7. С позиции системного подхода рассмотрена методология обработки структурированных и типизированных данных для нейросетевого моделирования. Обосновано использование в системе методов нормализации, масштабирования, анализа на репрезентативность, корреляционного анализа.
8. Даны рекомендации по корректировке процедуры ячеечно-нейросетевого моделирования с использованием программно-алгоритмических средств разработанной системы в зависимости от результатов оценки адекватности ЯНМ на обучающих и тестовых выборках данных.

Глава 3. Разработка ячеечно-нейросетевой системы компьютерного анализа последствий аварийного загрязнения атмосферы промышленными источниками

3.1. Организационная и функциональная структуры информационной системы «ЯНСКА»

Организационная структура любой ИС предполагает наличие самостоятельных блоков, имеющих собственную, не всегда одинаковую программную или технологическую платформу. Также она предполагает участие человека. Это могут быть различные группы пользователей: администратор, оператор, руководитель, принимающие решение каждый на своем уровне, в пределах своей компетенции. Блоки организационной структуры и пользователи системы связываются между собой информационными и управляющими потоками данных. Разработанная ИС «ЯНСКА» организована в соответствии со структурой, приведенной на рис. 3.1.

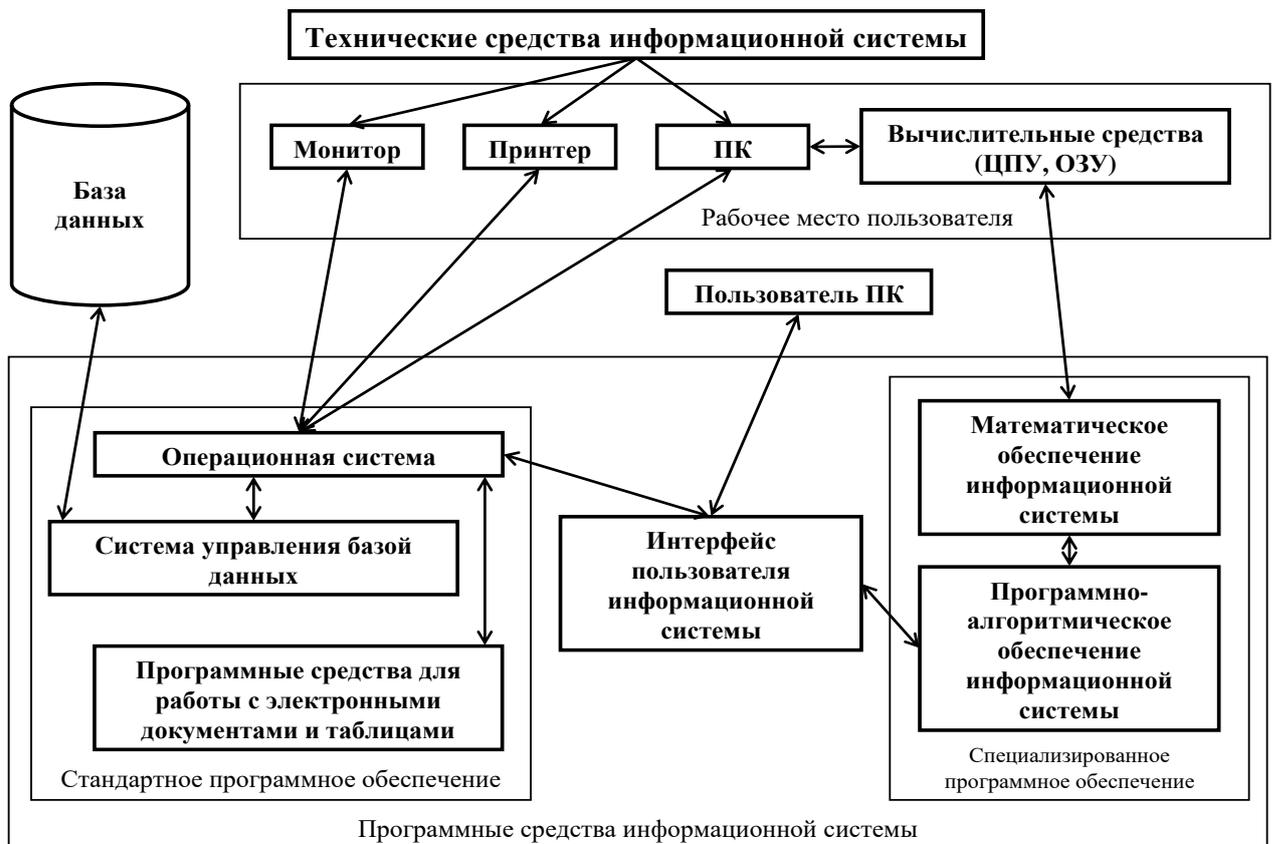


Рис. 3.1. Организационная структура информационной системы

В состав организационной структуры входят:

- подсистема технических средств, включающая вычислительные средства, а также средства ввода данных и вывода (представления) информации пользователю, базирующиеся на современных информационно-коммуникационных технологиях;
- подсистема программных средств, включающая стандартное и специализированное программно-алгоритмическое обеспечение, взаимодействия с которым персонала осуществляется через интерфейс пользователя системы.

Стандартное ПО, в свою очередь, включает современную операционную систему, СУБД и средства для работы с электронными документами и таблицами. Специализированное ПО – это комплекс математического и программно-алгоритмического обеспечения, в котором реализована вся методическая база и учтена специфика решаемых задач экологической безопасности атмосферы промышленных территорий.

Функциональная структура любой ИС включает в себя комплекс подсистем, каждая из которых имеет свое собственное, достаточно четко ограниченное назначение. В основном подсистемы реализуются в виде самостоятельных модулей программно-алгоритмического обеспечения, служащих для осуществления человеко-машинного взаимодействия с техническими средствами и БД системы. Само человеко-машинное взаимодействие обуславливается моделями и методами, реализованными в программном комплексе.

На рис. 3.2 представлена функциональная структура разработанной ИС «ЯНСКА». В ней, исходя из их функционального назначения, выделяются пять основных подсистем. За основу взята, переработана и дополнена функциональная структура, ранее описанная в работе [107].

Подсистема ввода и вывода данных предназначена для загрузки и выгрузки универсальной и обучающей выборок, используемых для обучения нейросетевых моделей, ввода и сохранения настроек ЯНМ, исходных данных по условиям моделирования, сохранения результатов моделирования в файлах данных и отчетов (рис. 3.3). Она состоит из двух основных блоков: блок ввода и блок вывода данных.

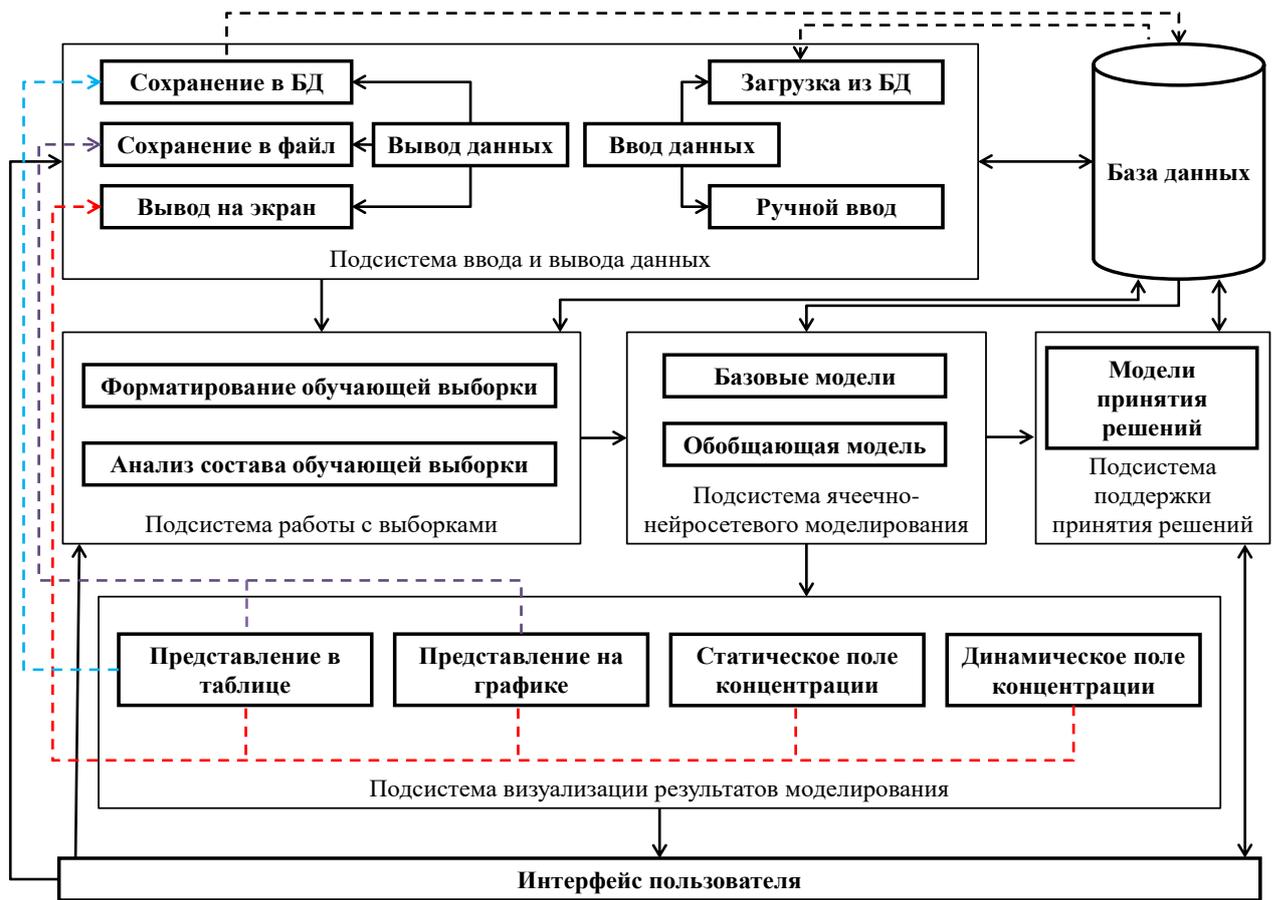


Рис. 3.2. Функциональная структура информационной системы

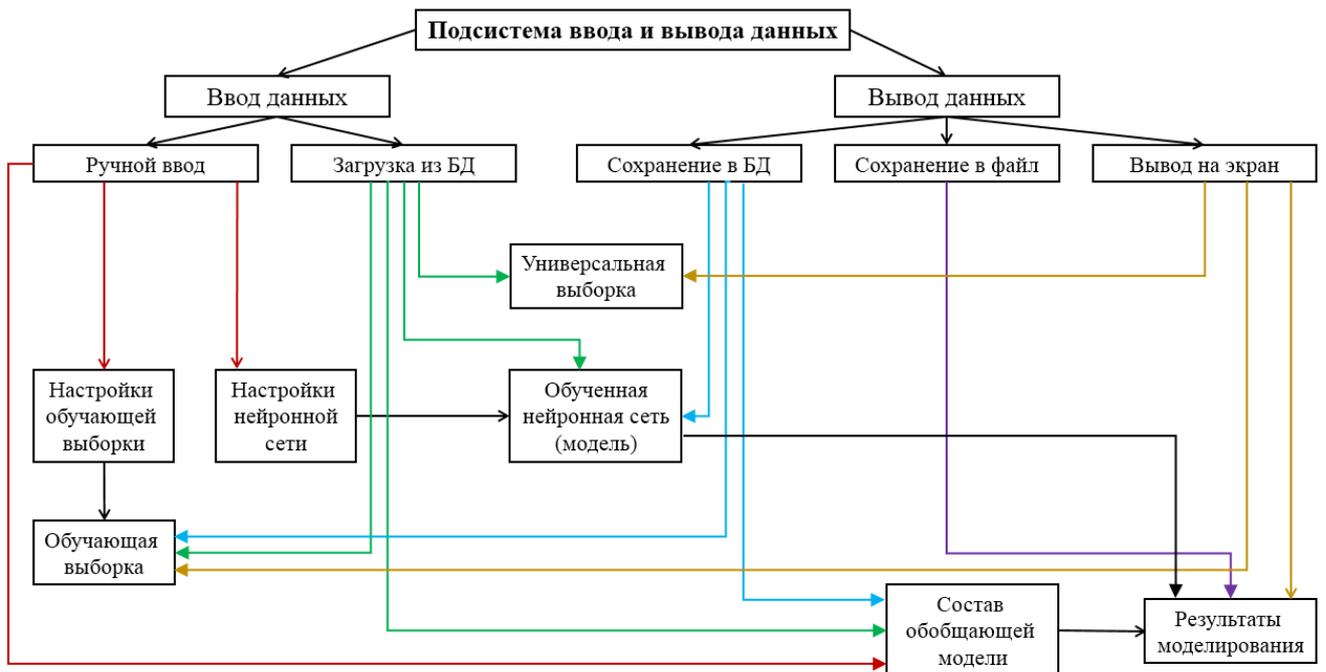


Рис. 3.3. Структура подсистемы ввода и вывода данных

Блок ввода данных необходим для ручного ввода исходных данных и для загрузки данных из БД. Ручным вводом задаются настройки ИНС (количество слоев, нейронов в слое), настройки обучения ИНС (количество эпох обучения, скорость обучения и другие), а также настройки и исходные данные для моделирования распространения ЗВ. Из БД загружаются универсальная и обучающая выборки, настройки отдельных и обобщающих моделей и исходные данные для моделирования.

Блок вывода данных предназначен для представления всей необходимой пользователю информации и результатов на экране, для сохранения настроек моделей в БД и для сохранения результатов моделирования в файлах данных и отчетах.

Источником и целью назначения указанной информации в зависимости от ее характера и использующей подсистемы являются рабочие файлы системы, файлы отчетов и БД.

Подсистема работы с выборками. В ИС «ЯНСКА» предусмотрена тщательная работа с выборками. Основными блоками подсистемы являются: блоки форматирования и анализа состава обучающей выборки (рис. 3.4).



Рис. 3.4. Структура подсистемы работы с выборками

При формировании обучающей выборки для отдельной модели из универсальной выборки указывается вид переменных (входная или выходная) и проводится определенное пользователем масштабирование данных с последующим их

нормированием. Используемые в ИС «ЯНСКА» способы масштабирования представлены в п. 2.4.

Анализ состава обучающей выборки включает следующие возможности: анализ репрезентативности, корреляционный анализ и анализ примеров с последующим исключением повторов, устранением противоречий и исключением переменных с нулевым выходным вектором. Это обеспечивает наиболее качественное обучение ИНС по алгоритму обратного распространения ошибки и, как следствие, более точные результаты моделирования.

Подсистема ячеечно-нейросетевого моделирования позволяет получать модели переноса или распределения загрязняющей примеси между ячейками на основе обученных ИНС, а также производить расчеты с использованием полученных моделей (рис. 3.5). Эта подсистема делится на два блока: блок моделей, включающий пять отдельных моделей, и блок обобщающей модели.



Рис. 3.5. Структура подсистемы ячеечно-нейросетевого моделирования

В блоке моделей реализована индивидуальная работа с каждой из моделей, подробно описанных в п. 2.3. Во втором блоке реализована работа с обобщающей моделью, с помощью которой можно получить поля концентраций при постоянных и переменных метеоусловиях.

Основными результатами индивидуальных и обобщающих моделей являются: концентрации в отдельных точках, профили изменения концентраций во времени и пространстве и значения токсодоз.

Благодаря подсистеме визуализации результатов моделирования все результаты моделирования выводятся пользователю на экран монитора в удобной для него форме или сохраняются в файл (рис. 3.6).



Рис. 3.6. Структура подсистемы визуализации результатов моделирования

Все численные результаты концентраций и токсодоз выводятся в виде таблиц, а также в виде графических изображений (профили изменения концентраций во времени и пространстве, токсодозы). При моделировании полей концентрации, результаты моделирования представлены пользователю в виде статических или динамически меняющихся изображений на экране монитора.

Все графики и таблицы можно сохранить в файл для дальнейшего использования в сторонних ИС.

Подсистема поддержки принятия решений реализует соответствующую функцию на основе моделей и методов принятия решений по управлению экологической безопасностью, заложенных в компьютерную систему. Существует несколько классов и групп таких методов. К классу формализованных методов принятия решений относят [108]:

- математические, позволяющие математически описать взаимозависимость процессов и явлений предметной области и синтезировать единственное решение;
- методы СА, позволяющие количественно и качественно установить взаимозависимость составных частей сложных систем и стратегию их эволюции;

- методы, основанные на экспертных оценках (главным образом, качественных) специалистов предметной области.

К классу неформализованных методов относятся:

- методы группового принятия решений в результате совместного обсуждения или разрозненного (независимого) анализа проблемы членами экспертной группы (мозговой штурм, метод Дельфы);
- метод анализа и выбора альтернатив, позволяющий оценить последствия всех возможных решений в текущей ситуации;
- метод деревьев решений – для задач принятия последовательности решений в сложных системах.

С учетом специфики решения задач экологической и промышленной безопасности, особенностей использованной в ней логико-математической базы, а также многогранности и масштабности возможных последствий в ИС «ЯНСКА» решено использовать метод анализа и выбора альтернатив.

3.2. Информационно-логическая и даталогическая модели данных информационной системы «ЯНСКА»

Большой объем данных, используемых в системе для обучения ЯНМ, их настройки, хранения и других целей обусловил необходимость разработки БД. Для ее реализации используется СУБД MySQL. Структура связей данных и их состав приведен в информационно-логической модели на рис. 3.7.

Таблица «Универсальные выборки» содержит описание, а также характеристики источника выброса и метеорологических условий, при которых были получены примеры, входящие в состав таких выборок. Сами примеры содержатся в отдельной одноименной таблице. Каждая запись содержит ссылочный ключ на универсальную выборку, к которой относится данный пример. Состав полей таблицы «Примеры выборки» таков, что в ней можно хранить обучающие и тестовые данные для любых видов окрестностей ЯНМ, подробно описанных в п. 2.3. Поля, не используемые для окрестностей целевого вида, остаются пустыми.

Теоретически в БД могут содержаться примеры, полученный как в ходе натурного, так и в ходе вычислительного эксперимента. На практике в связи с отсутствием натуральных экспериментальных данных для каких-либо видов окрестностей ЯНМ, в базе хранятся и используются для обучения ИНС только примеры, полученные по методике оценки последствий химических аварий [64].

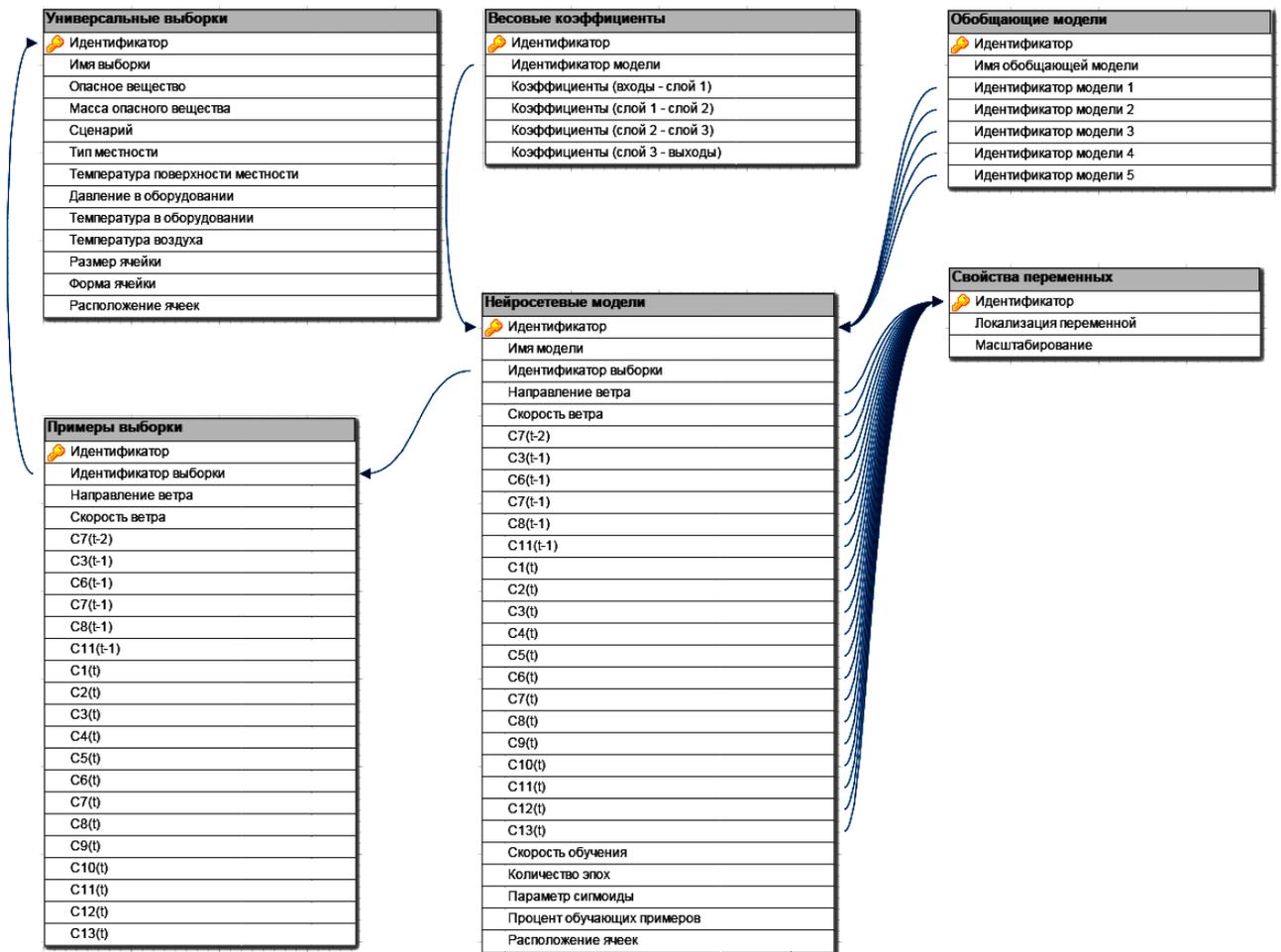


Рис. 3.7. Информационно-логическая модель данных

При формировании выборок для отдельных нейросетевых моделей, из универсальной выборки импортируются необходимые данные. В таблице «Нейросетевые модели» для каждой переменной указываются ее вид (входная или выходная) и, при помощи ссылочного ключа на таблицу «Свойства переменных», способ масштабирования. Поле остается пустым, если переменная не задействуется в окрестности модели. Также в таблице «Нейросетевые модели» хранятся все настройки ИНС и алгоритма ее обучения.

В результате удовлетворительного обучения ИНС полученные весовые коэффициенты сохраняются в одноименную таблицу.

Все сохраненные в БД нейросетевые модели могут применяться в обобщающей модели, которая используется для формирования полей концентрации в различные моменты времени после аварийного выброса ОХВ. Это становится возможным благодаря тому, что каждая модель решает свою узкоспециализированную расчетную задачу: интерполирование и экстраполирование концентрации примеси в ячейках, расчет продольных и поперечных профилей, прогнозирование концентрации на заданный шаг по времени. Идентификаторы базовых моделей (не менее

двух и не более пяти), входящих в одну обобщающую модель, перечисляются в таблице «Обобщающие модели».

В даталогической модели данных, которая представлена на рис. 3.8, отражены оригинальные названия таблиц и полей, типы данных для каждого из полей, а также связи между таблицами.

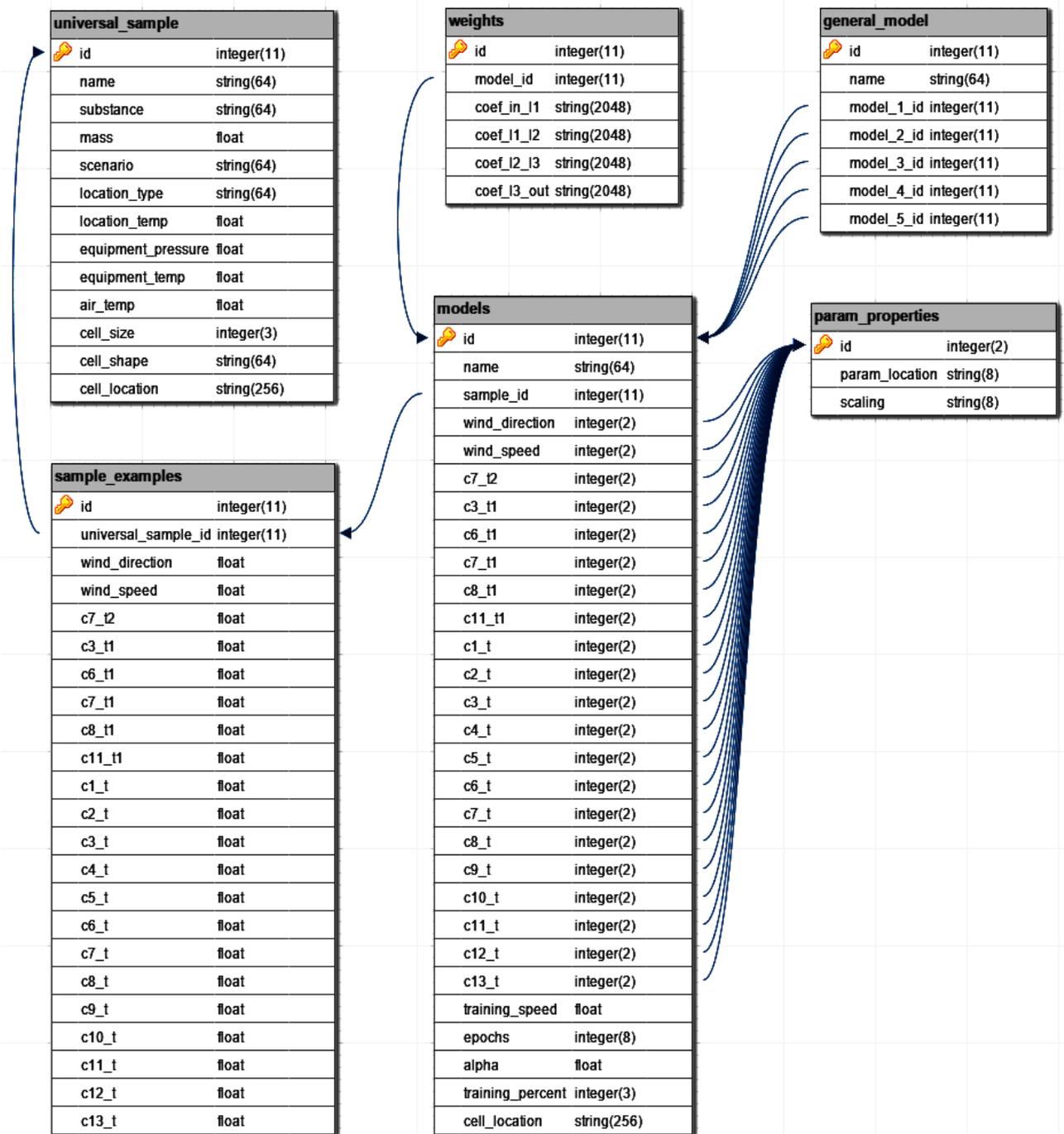


Рис. 3.8. Даталогическая модель данных

В реализованной БД используется всего три наиболее популярных типа данных: целочисленный (integer), число с плавающей точкой (float) и строковый

(string). Причем строковый тип данных используется не только для полей, где хранятся строковые переменные, но и для полей, предназначенных для хранения массивов. Так, например, в таблице «weights» хранятся массивы со значениями весовых коэффициентов между слоями ИНС (поля coef_in_11, coef_11_12, coef_12_13 и coef_13_out).

3.3. Разработка компьютерных методов визуализации информации и проектирование интерфейса пользователя информационной системы

Проектирование и дальнейшая разработка пользовательского интерфейса ИС «ЯНСКА» происходила с учетом требований, предъявляемых к разработке современного ПО [109].

ИС «ЯНСКА» была создана в интегрированной среде разработки программного обеспечения Delphi 7. К визуальным компонентам этой среды относятся формы, панели, кнопки, списки, поля ввода, текстовые поля, таблицы, опции, диалоги и другие. Рассмотрим основные элементы, которые используются в интерфейсе пользователя ИС «ЯНСКА».

Формы. Объект TForm является родительским объектом по отношению ко всем остальным объектам. На нем размещаются все стандартные элементы интерфейса, такие как меню, кнопки, поля ввода и другие.

Для удобного и рационального расположения на рабочей форме всех элементов управления используются **страницы с закладками, панели и разделители** (рис. 3.9).

Страницы с закладками (объект TPageControl) используются для тематического разбиения основных разделов пользовательского интерфейса, а именно на разделы работы с выборками, обучения ИНС, работы с моделями и с обобщающей моделью. Панель (объект TPanel) используется как подложка под панель управления и рабочее поле программы, между которыми используется разделитель (объект TSplitter). Все эти элементы также использовались и на рабочем поле программы для группировки различных элементов интерфейса пользователя ИС «ЯНСКА».

Неотъемлемой частью пользовательского интерфейса также являются **кнопки и поля ввода** (рис. 3.9). Для повышения интуитивной понятности интерфейса в ИС «ЯНСКА» используются кнопки с пиктограммой (объект TBitBtn). Поля ввода (объект TEdit) используются для ввода пользовательских данных и их последующей обработки в программе.

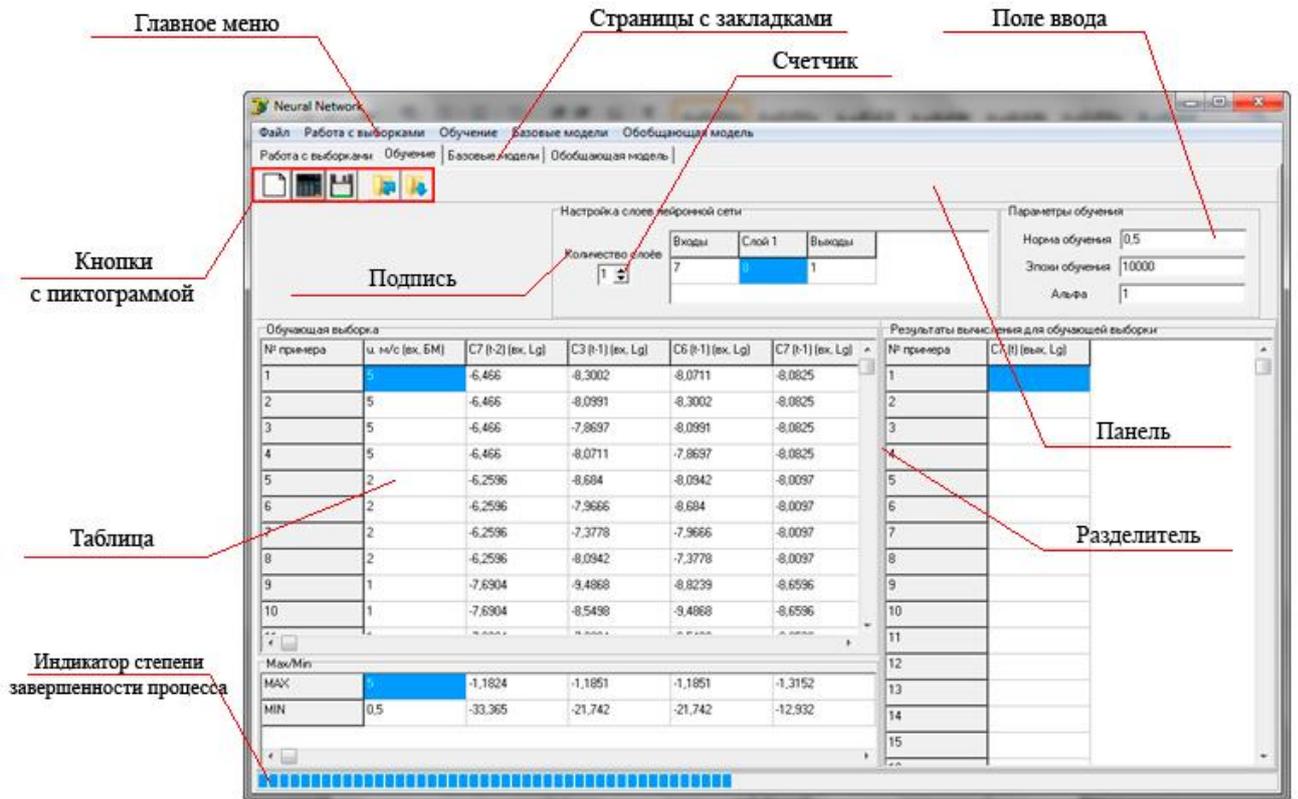


Рис. 3.9. Элементы интегрированной среды разработки Delphi 7 на примере экранной формы «Обучение»

Для отображения введенных или загруженных исходных данных, промежуточных и конечных результатов используются **таблицы** (объект TStringGrid) (рис. 3.9) и **графики** (объект TChart).

Для сохранения и загрузки данных используются стандартные элементы управления диалогами, такие как диалог **сохранения** (TSaveDialog) и **загрузки** (TOpenDialog).

Помимо основных объектов в ИС «ЯНСКА» также использовались главное меню, выпадающие списки, панели выбора опции, счетчики, индикатор степени завершенности процесса, подписи и рисунки.

Разработка интерфейса пользователя ИС «ЯНСКА» была основана на девяти базовых принципах проектирования пользовательского интерфейса [109].

Структурный принцип. Пользовательский интерфейс организован целесообразно, осмысленно и удобно. Главное меню, в котором собраны основные функции по управлению ИС, расположено вверху экранной формы (рис. 3.10) и является сквозным элементом, что привычно практически любому рядовому пользователю персонального компьютера. Основные тематические разделы ИС разделены посредством вкладок. Для каждой из вкладок имеется панель управления, расположенная в правом верхнем углу рабочего поля вкладки. Рабочее поле программы

состоит из стандартных элементов windows-приложений, таких, как таблицы, графики, поля ввода, кнопки управления и другие.

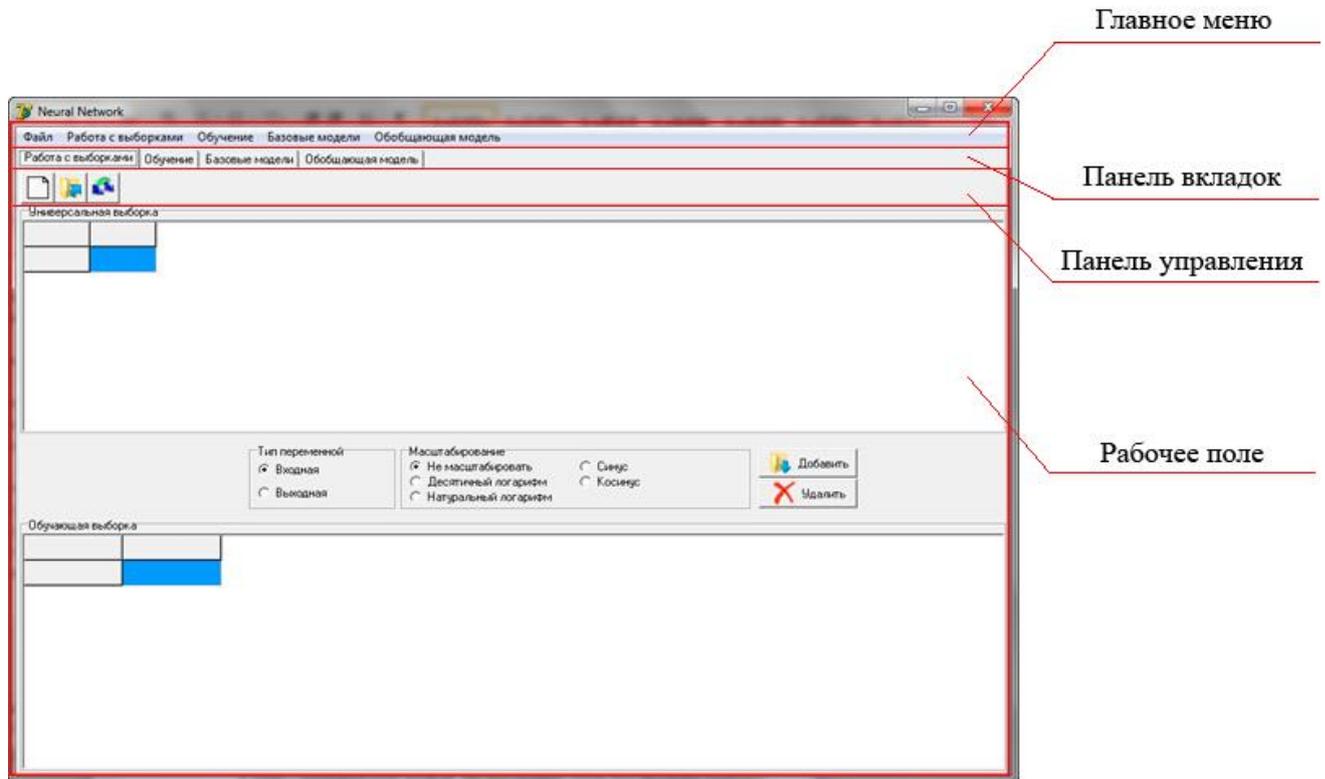


Рис. 3.10. Схема интерфейса пользователя на примере экранной формы «Работа с выборками»

Принцип простоты. ИС «ЯНСКА» имеет интуитивно понятный интерфейс пользователя. К примеру, при наведении на практически любой элемент рабочего поля программы всплывает подсказка, описывающая назначение данного элемента.

Принцип стабильности. Все элементы ИС стационарны и не изменяют свой внешний вид. Результаты, полученные при работе с ИС, отображаются в специально отведенных на рабочем поле программы местах.

Принцип видимости. Интерфейс пользователя ИС «ЯНСКА» не перенасыщен: нет большого количества мелких элементов, а также нет скрытых элементов управления. Реализован индикатор степени завершенности процесса, позволяющий наглядно определить происходит ли расчет необходимых значений в данный момент времени, а также приблизительно оценить время, которое потребуется для завершения расчета этих значений.

Принцип обратной связи. При работе по какому-либо сценарию, реализованному в ИС, в критические моменты, связанные с целостностью данных, появля-

ются всплывающие окна с наводящими вопросами, которые позволяют пользователю более точно определить, нужно ли ему данное действие в определенный момент времени или нет. Если пользователем допущена ошибка, например, при вводе в специальные текстовые поля данных, ИС также посредством всплывающих окон сообщит и поможет определить, где была допущена ошибка.

Принцип гибкости. ИС «ЯНСКА» предусматривает возможность работы в ней различных групп пользователей. Как следствие, интерфейс программного обеспечения может адаптироваться в зависимости от актуальной роли пользователя с тем, чтобы скрыть функции, недоступные ему, и, наоборот, обеспечить доступ к функциональным возможностям, соответствующим выбранной роли.

Принцип толерантности. При работе пользователя с ИС «ЯНСКА» перед выполнением какого-либо расчета и преобразованием вводимых им данных система проверяет корректность этих данных и не продолжает расчет в случае, если была допущена ошибка, тем самым сохранив все введенные пользователем данные. Также практически на любом этапе работы с ИС можно сохранить данные в БД (п. 3.2), что позволяет в случае непредвиденной ситуации вернуться практически на любой этап работы с ИС.

Принцип повторного использования. Так как данные можно сохранять в БД и файлы данных, то их можно использовать повторно. Это относится, например, к обучающим выборкам или обученным ЯНМ.

Принцип экономии времени. Так как в большинстве случаев ИС «ЯНСКА» используется в оперативном прогнозировании распространения ЗВ в атмосфере, то интерфейс ИС спроектирован таким образом, чтобы пользователь мог достичь необходимых результатов за минимальное время. Все подписи, подсказки и другие надписи в интерфейсе ИС лаконичны и точно описывают функциональность соответствующих им элементов. Все элементы управления хорошо видны и находятся в привычных местах для пользователя. За счет стандартных для windows-приложений изображений на кнопках управления пользователю интуитивно понятно, для чего предназначен тот или иной элемент управления. Навигация за счет вкладок проста и удобна, логически выстроена, при этом требуется минимальное количество шагов для достижения цели в соответствии с решаемой локальной задачей. Также навигация дублируется в сквозном элементе – главном меню, что позволяет перейти на любой этап работы с ИС без лишних действий.

Таким образом, интерфейс ИС «ЯНСКА» построен с учетом всех современных принципов проектирования и обладает всеми основными признаками современных графических пользовательских интерфейсов:

- стандартность. В структуре интерфейса используются только стандартные элементы управления, принятые для большинства существующих приложений;
- дружелюбность. На всех элементах управления имеются всплывающие подсказки, позволяющие быстро понять его назначение;
- интуитивность. Все основные блоки управления расположены в стандартных для большинства приложений местах, что позволяет быстро сориентироваться пользователю и начать работу с программой;
- эргономичность. Вся информация и результаты представляются на экране в удобном и не утомительном для зрительного восприятия виде, а структура расположения элементов управления организована так, чтобы минимизировать количество нажатий кнопок, выборов опций и переключений между закладками.

Помимо стандартных компьютерных методов и принципов визуализации информации в ИС при разработке данной системы предложены и частично реализованы следующие:

- синхронизация изменений результатов расчета в отображаемых и скрытых элементах управления – позволяет мгновенно переключаться между различными формами представления одних и тех же результатов (изображение, график, табличные данные), обеспечивая одновременно их наглядность и доступ к физической сущности;
- интерактивная многосвязность – позволяет переключаться между различными связанными между собой исходными и результирующими данными, обеспечивая возможность более глубокого анализа результатов со стороны пользователя и одновременность решения сразу нескольких задач;
- интеграция результатов ячеечно-нейросетевого моделирования с имеющимися в распоряжении пользователя ситуационными планами и картами – способствует повышению оперативности и качества принимаемых решений на основе результатов оценки последствий аварийного выброса.

Исходя из вышесказанного, можно заключить, что выбранные и вновь разработанные компьютерные методы визуализации информации в ИС «ЯНСКА» позволяют значительно повысить эффективность решения с ее помощью различных задач, связанных с ОВОС загрязнения атмосферы промышленными источниками в результате аварийных выбросов.

3.4 Алгоритмическое обеспечение интеллектуальной поддержки принятия решений по результатам работы информационной системы «ЯНСКА»

Методическое обеспечение задач принятия решений весьма разнообразно. Выбор метода решения задачи зачастую определяется не только целями решаемой задачи, но и условиями, в которых получаются исходные данные, их источниками. В рамках данной работы исследованы два метода решения задачи принятия решений:

- метод нечетко-логического вывода принимаемого решения [110];
- метод анализа и выбора альтернатив [111].

В случаях, когда задача принятия решения связана с неопределенностью в исходной информации или внешних воздействий, существенно определяющих результат, на помощь приходят новые, современные подходы, основанные на методах ИИ, например, нечеткая логика, теория нечетких множеств и мягкие вычисления. Сюда можно отнести алгоритмы принятия решений на основе процедуры нечетко-логического вывода Мамдани, Тсукамото, Ларсена и Сугено.

Рассмотрим задачу принятия решений, в которой для получения результата производится анализ двух нечетких влияющих факторов [110]. Пусть a и b – точные или приближенные количественные оценки входных характеристик. Каждое из них принадлежит некоторым областям определения – универсальным множествам нечетких множеств A и B . Индексы i и j обозначают порядковый номер нечетких подмножеств (категорий) в соответствующих множествах A и B . Любое из входных значений может быть отнесено как к одному, так и к нескольким нечетким подмножествам. Переменные \tilde{a} и \tilde{b} – нечеткие числа, соответствующие исходным количественным оценкам. Значения $\mu_A(a_i)$ и $\mu_B(b_i)$ – степени принадлежности входных характеристик нечетким множествам. Выходная переменная r – численное значение принимаемого решения. Нечеткое число \tilde{r} – результат выполнения процедуры нечетко-логического вывода решения.

Приведем перечень этапов алгоритма Мамдани.

1. Выполняется фаззификация входных численных характеристик a и b . Как результат данного этапа – нечеткие входные характеристики: \tilde{a}_i, \tilde{b}_i с соответствующими степенями принадлежности $\mu_A(a_i)$ и $\mu_B(b_i)$ различным входным нечетким подмножествам. В результате фаззификации входных характеристик получают следующие нечеткие условия:

$$\tilde{a} = (\tilde{a}_1 \cap \mu_{A1}) \cup (\tilde{a}_2 \cap \mu_{A2}) \cup \dots \quad (3.1)$$

$$\tilde{b} = (\tilde{b}_1 \cap \mu_{B1}) \cup (\tilde{b}_2 \cap \mu_{B2}) \cup \dots \quad (3.2)$$

2. Составляются правила логического вывода нечетких подзаключений для всех возможных попарных комбинаций нечетких чисел. За основу обычно берется специальная база (таблица) правил, однако при наличии достаточно компетентного эксперта предметной области правила могут быть сформированы «с листа». Ниже представлен пример нечеткого продукционного правила для пары нечетких входных значений i и j :

$$(\tilde{a}_i \cap \mu_{A_i}) \cap (\tilde{b}_j \cap \mu_{B_j}) \rightarrow (\tilde{r}_{ij} \cap \min\{\mu_{A_i}, \mu_{B_j}\}) \quad (3.3)$$

3. Осуществляется композиция нечетких частных решений, представляющих собой результаты применения всех продукционных правил на предыдущем этапе. В результате получается следующее нечеткое число:

$$\tilde{r} = \bigcup_i \bigcup_j (\tilde{r}_{ij} \cap \min\{\mu_{A_i}, \mu_{B_j}\}) \quad (3.4)$$

Производится дефаззификация – переход от нечеткой формы результирующего решения к четкому численному выражению с использованием одного из методов: максимума, центра тяжести или какой-либо из его модификаций.

Несмотря на то, что процедура Мамдани используется наиболее часто, другие алгоритмы нечетко-логического вывода также могут быть задействованы в процессе принятия решений в условиях неопределенности. Отличия могут заключаться не только в содержании этапов, но и в составе исходных данных и экспертной информации для вывода решений.

Наибольшие отличия от остальных имеет алгоритм вывода Сугено. Если для алгоритмов Мамдани, Тсукамото и Ларсена необязательно наличие количественной оценки входных переменных (достаточно качественных, нечетких оценок, сделанных специалистом предметной области), то алгоритм Сугено без них будет неработоспособен. Обратная картина с математическим описанием функции принадлежности получаемого решения: в первых трех алгоритмах оно обязательно для получения количественной оценки решения, а в алгоритме Сугено не требуется.

Проведен сравнительный анализ алгоритмов нечетко-логического вывода, результаты которого систематизированы и сведены в нижеприведенную таблицу.

**Сравнительный анализ алгоритмов нечетко-логического
вывода решения**

| Отличительный признак | Алгоритм нечетко-логического вывода | | | |
|---|-------------------------------------|---|--|---|
| | Мамдани | Тсукамото | Ларсена | Сугено |
| Наличие численного выражения входных переменных | Факультативно | Факультативно | Факультативно | Обязательно |
| Способ учета степеней принадлежности входных переменных в условиях продукционных правил | Усечение нечеткого множества | Усечение нечеткого множества | Умножение нечеткого множества на константу | Не учитываются |
| Применение этапа дефаззификации | К композиции подзаключений | К отдельным подзаключениям | К композиции подзаключений | Не применяется |
| Способ учета степеней принадлежности входных переменных при численной оценке решения | Не учитывается | В качестве весовых коэффициентов при усреднении | Не учитывается | В качестве весовых коэффициентов при усреднении |
| Наличие математического описания функции принадлежности решения | Есть | Есть | Есть | Нет |

В качестве одной из пользовательских настроек в системе ППР может быть предложен выбор одного из нескольких вариантов реализации алгоритма. Но нужно отдавать себе отчет в том, что конкретные ЛПР, не будут вдаваться в подробности этапов, лежащих в основе каждого из алгоритмов, поэтому целесообразнее данный выбор оставить все же за разработчиками, имеющими представление о предметной области.

Одним из наиболее эффективных методов принятия решений в интеллектуальных компьютерных системах в условиях отсутствия явной нечеткости, неопределенности исходной информации и внешних воздействий является метод анализа альтернатив управленческих решений [111].

При реализации данного метода рассматриваются различные варианты принимаемых решений и последствия, к которым они могут привести (рис. 3.11). Последствия, в зависимости от их качественных и количественных характеристик, оцениваются каким-либо критерием. Проще всего использовать количественные

характеристики, которые позволяют оценить значение критерия в численном выражении и проранжировать альтернативные решения. При необходимости использовать для оценки альтернатив качественные характеристики их все равно необходимо шкалировать, например, в баллах от 1 до 10, а затем суммировать полученные баллы с учетом весовых коэффициентов, устанавливаемых экспертом предметной области. Возможен смешанный вариант, когда для расчета критерия используются одновременно количественные и качественные характеристики. В этом случае они должны быть предварительно нормализованы, а уже затем взвешены.

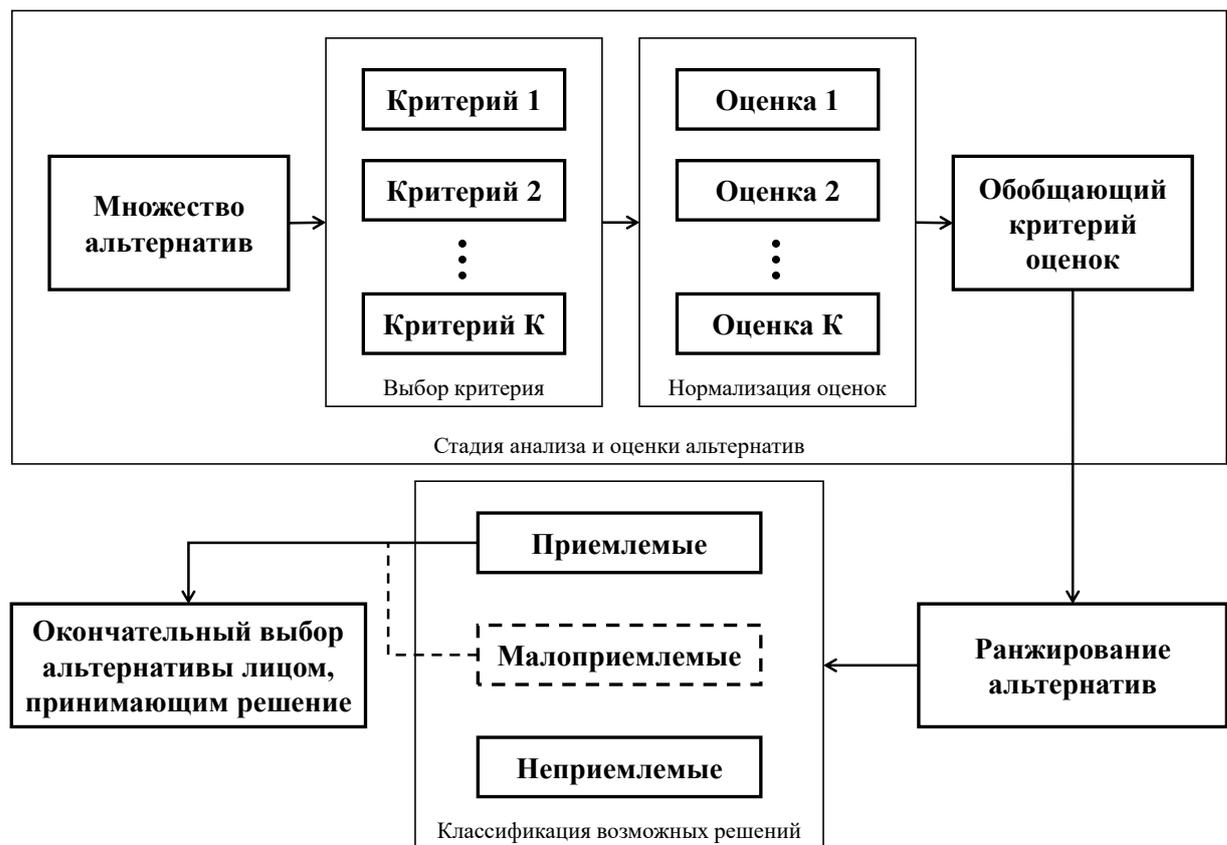


Рис. 3.11. Блок-схема алгоритма принятия решений на основе анализа и выбора альтернатив

В зависимости от выбранных критериев последствия могут быть разделены на положительные и отрицательные. Как следствие, альтернативы принимаемых решений следует ранжировать в порядке убывания приоритета в первом случае от лучших значений критериев к худшим, а во втором, наоборот, от худших – к лучшим.

Расставленные в порядке убывания приоритета решения классифицируются на приемлемые и неприемлемые. Допустим промежуточный класс малопринимлемые.

мых решений, принимаемых в исключительных случаях. Система может предлагать одно или нескольких приемлемых или малопримемлемых решений, на которые не распространяются какие-либо из известных ей ограничений. Окончательный выбор действия остается за ЛПР, делающим этот выбор также с учетом ограничений, возможно, не известных компьютерной системе.

В целом выбор алгоритмического обеспечения интеллектуальной ППР остается за разработчиком системы ППР. Следует отметить, что при использовании результатов работы разработанной ИС «ЯНСКА» в качестве источника исходных данных для последующей выработки возможных решений, предъявляемых ЛПР для выбора, могут быть использованы оба рассмотренных метода. Это связано с тем, что неопределенность в исходной информации и сопутствующих факторах рассеяния вредной примеси в результате химической аварии, в любом случае, учтена в ЯНМ, используемых для расчета единичных концентраций, концентрационных профилей и зон токсического поражения.

3.5. Программная реализация основных сценариев визуализации, трансформации и компьютерного анализа информации

В основу работы ИС «ЯНСКА», которая используется для моделирования последствий аварийных выбросов на ХОО, положены ЯНМ.

Рассмотрим работу ИС на примере основных экранных форм. На рис. 3.12 представлен общий вид экранной формы при запуске программы.

Работу в программе можно разделить на 4 этапа (раздела):

1 этап – работа с выборками. На данном этапе из универсальной выборки составляется обучающая выборка с масштабированными данными для последующего обучения ИНС. Определяется количество входов и выходов ИНС.

2 этап – обучение. На этапе обучения задаются настройки сети (количество скрытых слоев и нейронов в них) и основные параметры обучения (количество эпох, скорость обучения и другие). Происходит обучение ИНС и сохранение полученной модели в файл.

3 этап – базовые модели. На этом этапе реализована работа с ранее сохраненными моделями (получение концентраций ЗВ в точке и/или окрестности, профилей концентрации во времени).

4 этап – обобщающая модель. На последнем этапе происходит работа с обобщающей моделью, которая позволяет получить поля концентрации ЗВ, а также профили концентрации во времени и пространстве и токсодозы для любой точки прогнозируемого поля концентрации.

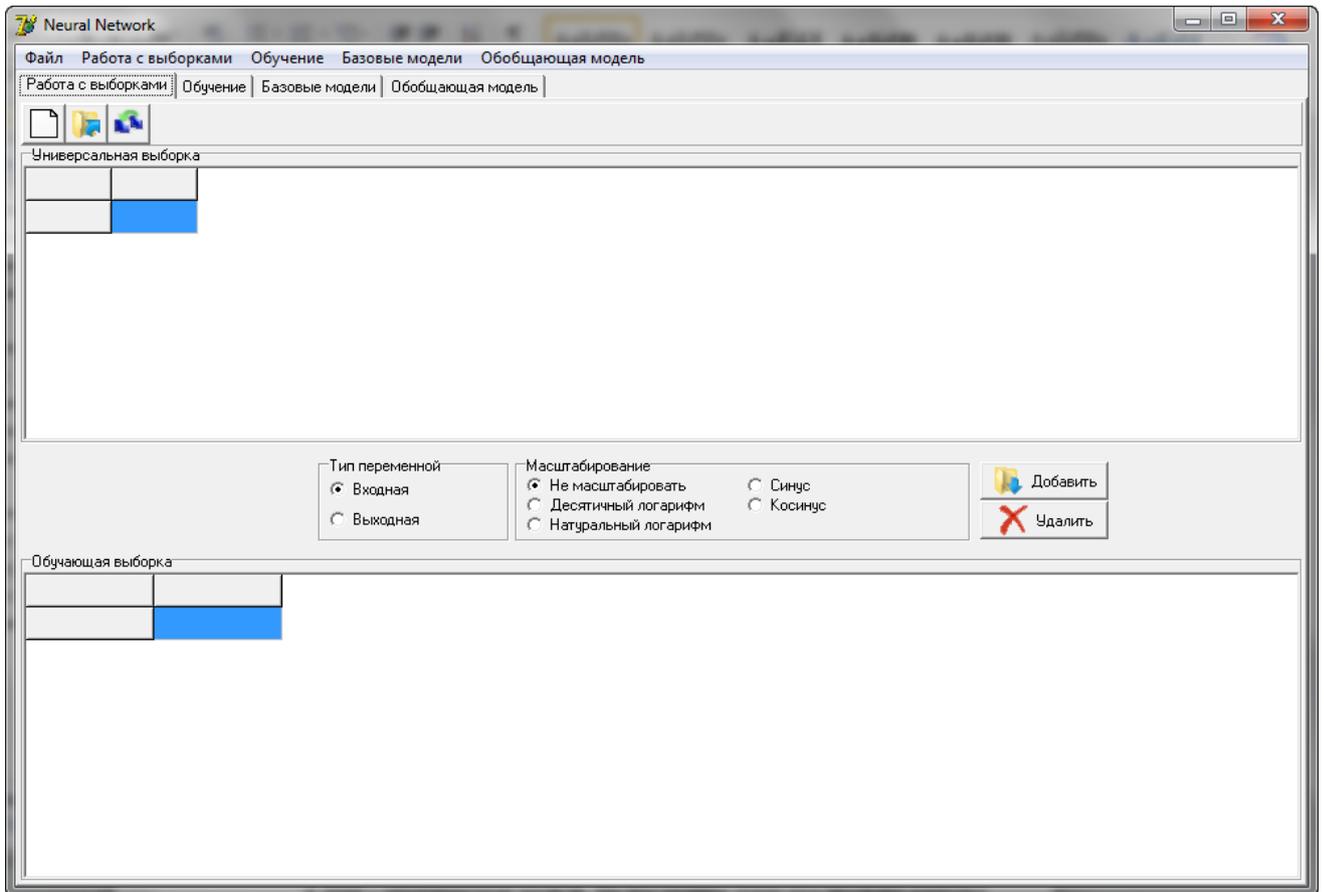


Рис. 3.12. Интерфейс пользователя при запуске программного модуля

Навигация по разделам программы производится через панель вкладок (рис. 3.10). ИС «ЯНСКА» построена таким образом, что можно начать работу в ней с любого этапа, предварительно загрузив необходимые данные из БД.

Главное меню состоит из пяти разделов (рис. 3.12). В разделе «Файл» пользователь получает возможность начать новый проект или выбрать пункт «Выход», чтобы закончить работу с ИС. Остальные четыре раздела главного меню соответствуют основным разделам программы и дублируют кнопки, расположенные на панели управления.

Далее детально рассмотрим работу в каждом из основных разделов ИС «ЯНСКА».

Работа с выборками. На рис. 3.13 представлен пример экранной формы «работа с выборками» в рабочем состоянии.

Для начала работы необходимо загрузить универсальную выборку из БД. Для этого нужно нажать кнопку «загрузить универсальную выборку» , расположенную на панели инструментов. В появившейся форме выводятся названия всех существующих в БД универсальных выборок, которые хранятся в поле «Имя выборки» таблицы «Универсальные выборки» (рис. 3.7). Для загрузки

одной из выборок необходимо указать нужное имя и нажать кнопку  .

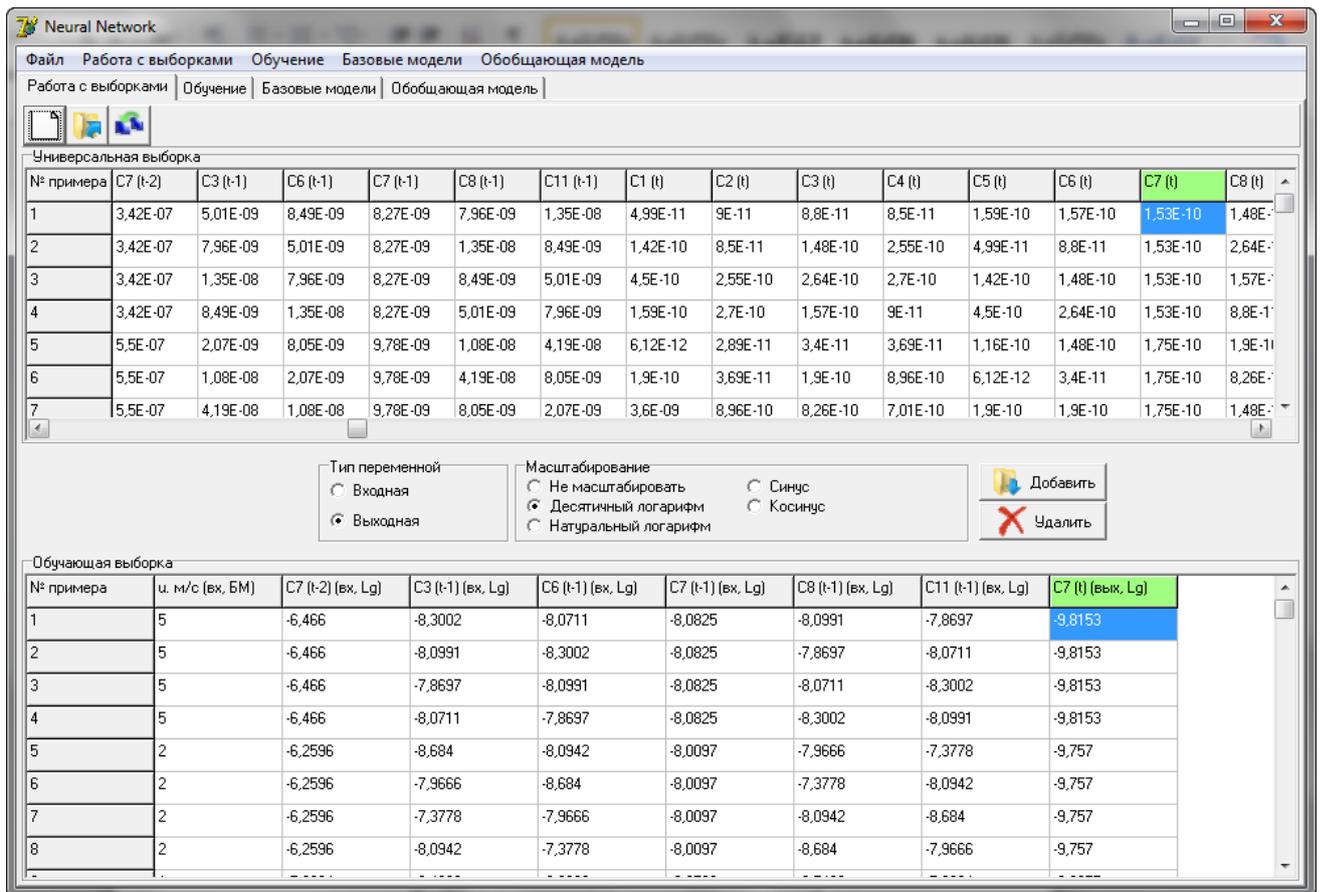
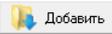
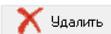


Рис. 3.13. Интерфейс экранной формы «Работа с выборками»

Для добавления данных в обучающую выборку необходимо выбрать нужный столбец из таблицы «универсальная выборка» нажатием левой кнопки мыши по столбцу (выбранный столбец подсветится зеленым цветом), выбрать тип переменной и масштабирование и нажать кнопку  .

Для удаления данных из обучающей выборки, аналогично добавлению, выбирается столбец из таблицы «обучающая выборка», после чего используется кнопка  .

После составления обучающей выборки, для перехода к обучению ИНС необходимо нажать кнопку «Экспортировать обучающую выборку и перейти к обучению»  . Чтобы очистить таблицы и начать работу сначала требуется нажать кнопку «Новый проект»  (при выполнении этого действия все не сохраненные данные на вкладках «Работа с выборками» и «Обучение» будут удалены).

Обучение. Экранная форма «Обучение» представлена на рис. 3.14.

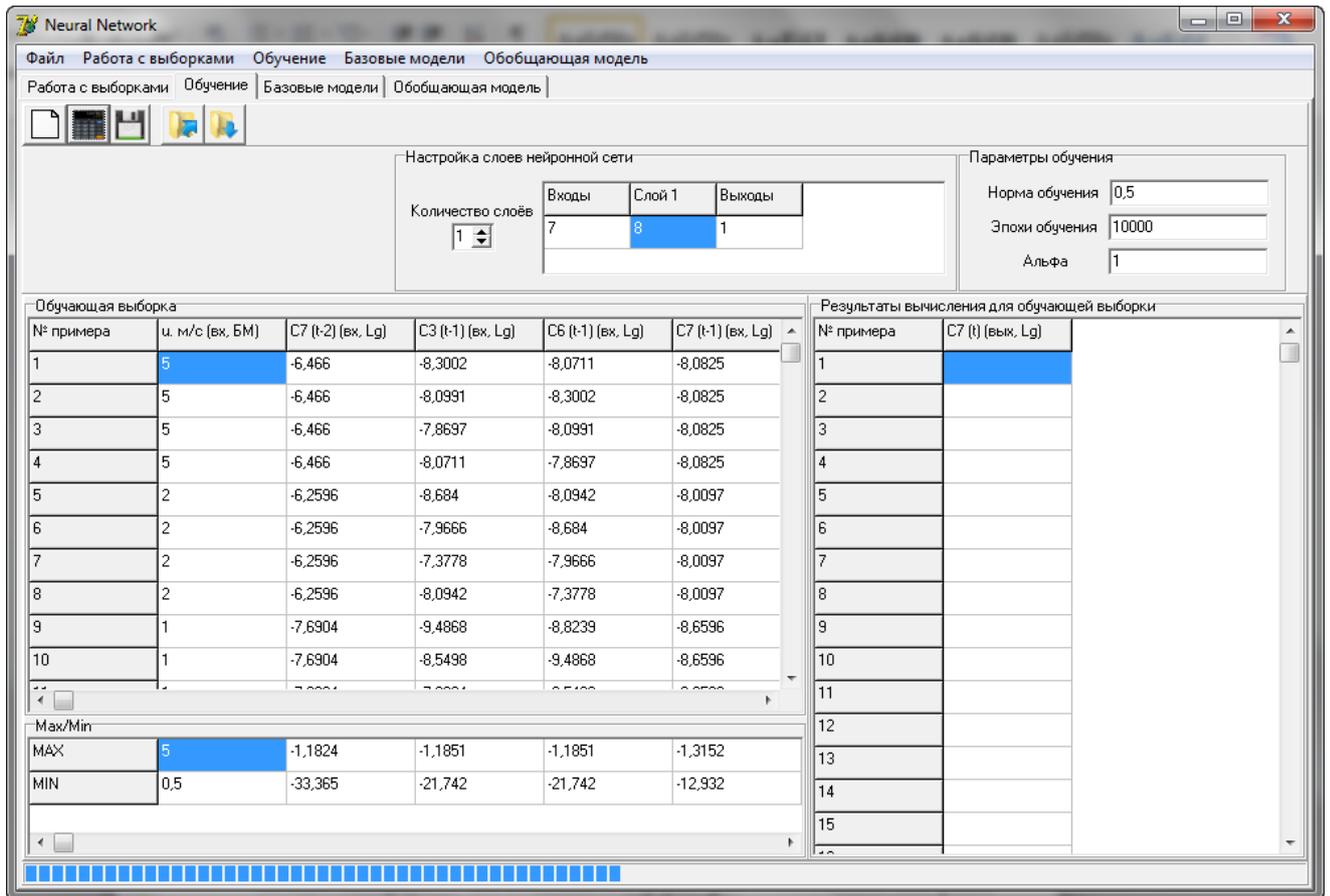
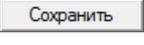


Рис. 3.14. Интерфейс экранной формы «Обучение»

Экспортированную обучающую выборку из раздела «работа с выборками», а также все параметры обучения можно сохранить в БД. Для этого требуется нажать кнопку «Сохранить данные для обучения»  и в появившейся форме указать имя модели, для которой они предназначены, после чего нажать кнопку . При выполнении этого действия обучающая выборка и параметры обучения (если они были заданы) сохранятся в таблицу «Нейросетевые модели» (рис. 3.7).

Помимо экспортирования обучающей выборки есть возможность загрузить ранее сохраненную в БД, нажав на кнопку «Загрузить данные для обучения»  и указав в появившейся экранной форме имя модели.

До начала обучения необходимо задать параметры обучения (коэффициент скорости обучения, количество эпох и параметр сигмоидной функции активации альфа) и настройки слоев ИНС. Количество скрытых слоев задается с помощью счетчик целых чисел . Для каждого скрытого слоя нужно задать число нейронов (количество входов и выходов ИНС задаются автоматически и их изменение не желательно, так как они должны соответствовать количеству входных и выходных данных обучающей выборки) (рис. 3.15).

| Входы | Слой 1 | Выходы |
|-------|--------|--------|
| 7 | 1 | 1 |

Рис. 3.15. Таблица для ввода количества входов, нейронов в слое и выходов

После ввода всех исходных данных можно приступить к обучению ИНС по алгоритму обратного распространения ошибки, нажав на кнопку «Обучить нейронную сеть» . После выполнения этого действия рассчитываются максимальные и минимальные значения для каждого ряда данных и выводятся в таблицу «Max/Min» (рис. 3.14).

Прогресс обучения отображается внизу экранной формы, индикатором степени завершенности процесса (рис. 3.14).

Сразу после завершения обучения ИНС рассчитываются выходные значения для обучающей выборки и выводятся на экранную форму в таблицу «Результаты вычисления для обучающей выборки» (рис. 3.14).

Для сохранения полученных весовых коэффициентов необходимо нажать кнопку «Сохранить модель» , при этом веса будут сохранены в таблицу БД «Весовые коэффициенты» (рис. 3.7), причем у одной нейросетевой модели может быть несколько наборов весовых коэффициентов (для разных структур ИНС).

Кнопка «Новый проект»  дублирует кнопку на вкладке «Работа с выборками» и выполняет те же функции.

Базовые модели. Данный раздел делится на пять подразделов, каждый из которых отвечает за определенную модель (на данный момент реализована работа пяти моделей). Каждый подраздел состоит из панели инструментов и рабочего поля (рис. 3.16).

Модель 1. Пример экранной формы данного подраздела представлен на рис. 3.17.

На панели инструментов имеются следующие кнопки: «Загрузить модель 1» , «Загрузить входные данные» , «Рассчитать»  и «Сохранить модели в обобщающую модель» .

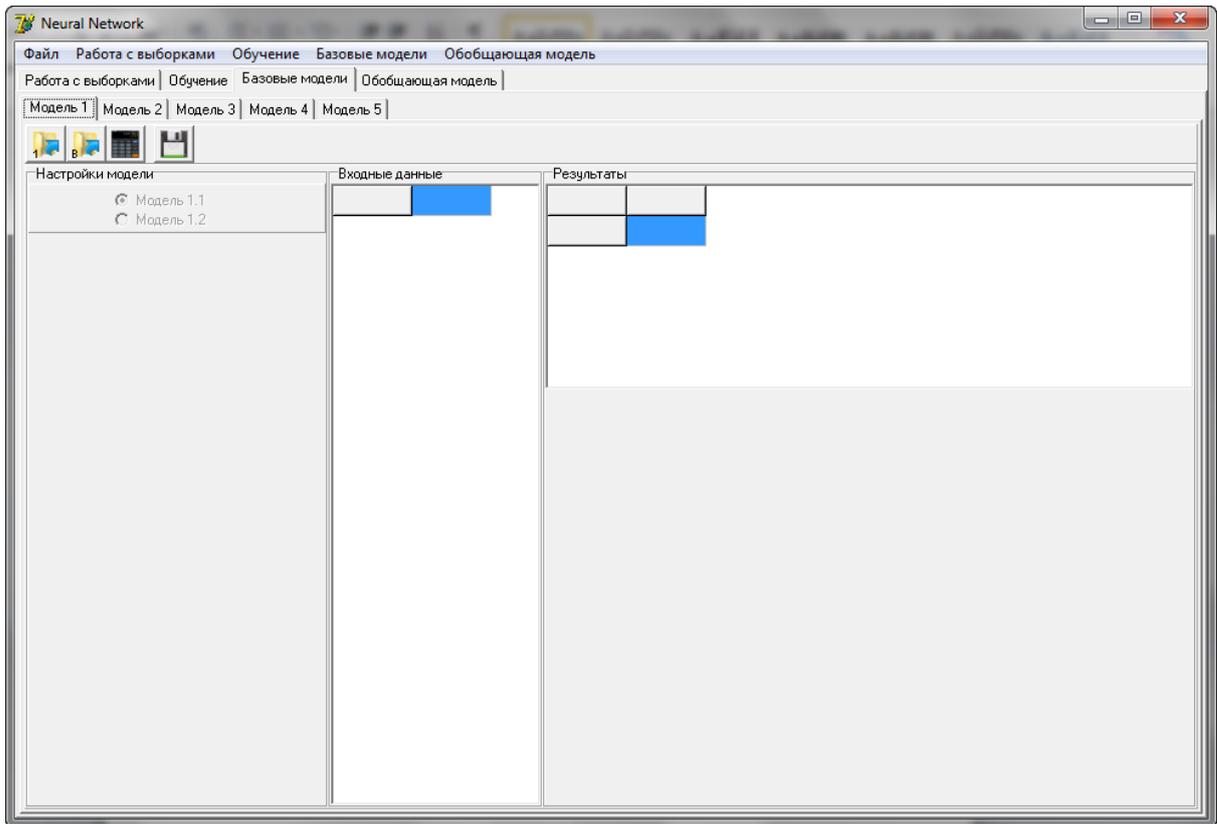


Рис. 3.16. Интерфейс экранной формы «Базовая модель» при запуске информационной системы

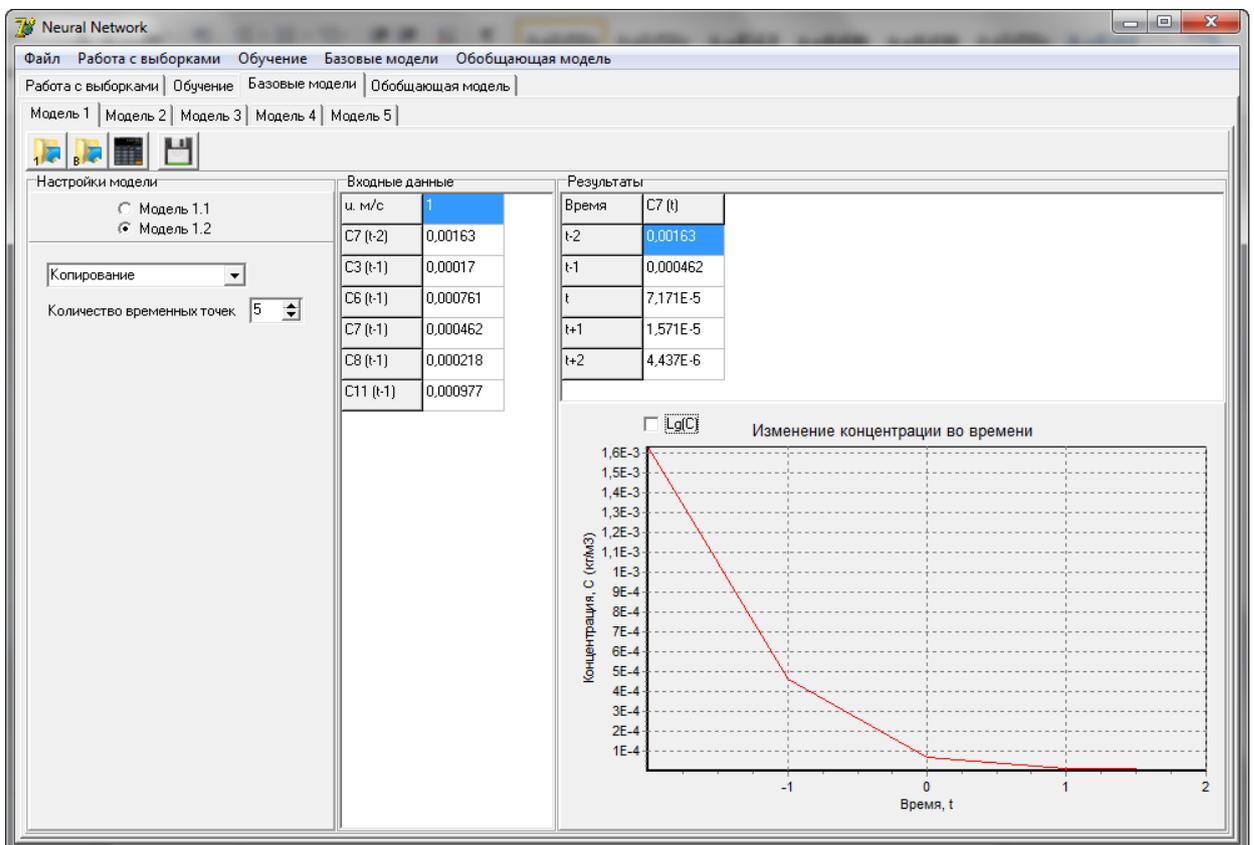


Рис. 3.17. Интерфейс экранной формы «Модель 1»

Чтобы начать работу с моделью, ее необходимо загрузить. Для этого используется кнопка «Загрузить модель 1» . В появившейся форме пользователю предлагается выбрать одно из перечисленных имен моделей, которые были сохранены на предыдущем этапе работы с ИС «ЯНСКА». Указав нужное имя, модели необходимо нажать на кнопку . Если для данной модели было сохранено несколько наборов весовых коэффициентов, то будет предложено выбрать одну из обученных структур ИНС. В обратном случае, если не будет найдено ни одного набора весов, то программа предложит пользователю перейти на вкладку «Обучение» и выполнить описанные выше действия для обучения данной нейросетевой модели.

Рабочее поле подраздела «Модель 1» состоит из трех основных форм: настройки модели, входные данные и результаты.

В форме «Настройки модели» выбирается по какой ЯНМ будет вестись расчет, тип зацикливания выходных переменных – копирование или пропорциональное изменение (для модели 1.2) и количество временных точек (для модели 1.2) для которых ведется расчет.

При выборе работы с моделью 1.1 расчет ведется на один дискретный момент времени вперед и для расчета необходимо только ввести входные данные в соответствующую форму методом ручного ввода или же нажатием на кнопку «Загрузить входные данные» , выбрав при этом необходимый файл в появившейся форме загрузки (единицы измерения каждой переменной должны соответствовать единицам измерения входных данных, на которых обучалась ИНС). Для получения результатов нужно нажать на кнопку «Рассчитать» . Пример расчета по модели 1.1 представлен на рис. 3.18.

Если выбрать расчет по модели 1.2 (на несколько дискретный моментов времени вперед), то необходимо задать дополнительные настройки расчета, а именно тип зацикливания выходных переменных (рис. 3.19) и задать количество временных точек, для которых будет вестись расчет с помощью счетчика целых чисел .

При зацикливании выходной переменной методом копирования, она подается во все ячейки окрестности фон Неймана прямым переносом. Если же выбран метод пропорционального изменения, то все входные значения в предыдущий момент времени изменяются в соответствии с рассчитанным коэффициентом пропорциональности:

$$K = \frac{C_7(\tau)}{C_7(\tau-1)} \quad (3.5)$$

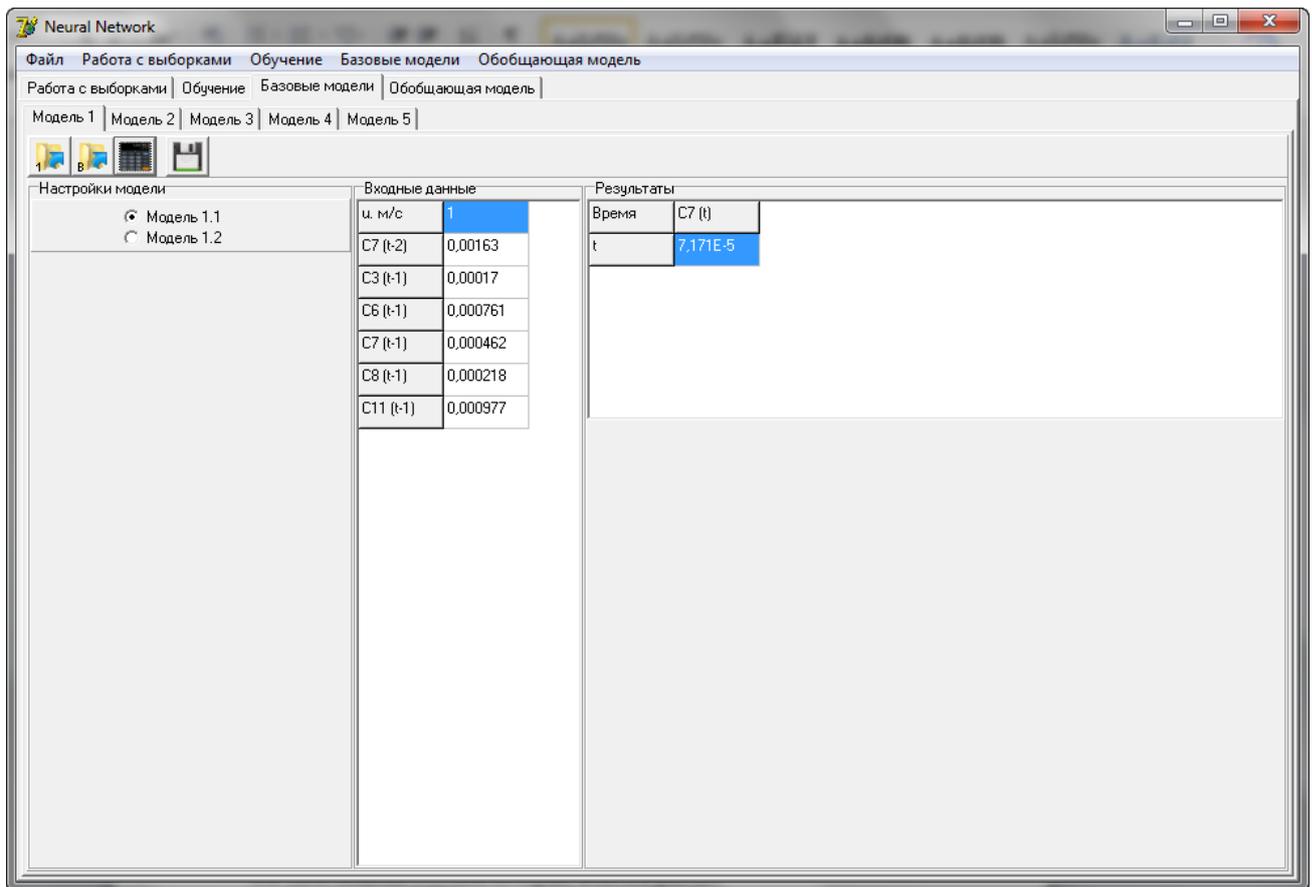


Рис. 3.18. Пример вывода результатов при расчете по модели 1.1

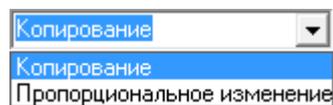
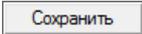


Рис. 3.19. Выбор типа зацикливания переменных

После настройки модели, аналогично модели 1.1, вводятся или загружаются из файла входные данные и нажимается кнопка «Расчитать»  для получения результатов (профили концентрации выводятся в табличной и графической формах). Пример вывода результатов для данной модели представлен на рис. 3.17.

Значения концентрации на графике «Изменение концентрации во времени» можно прологарифмировать поставив галочку в поле Lg(C), расположенном на графике (по умолчанию концентрация отображается в $\text{кг}/\text{м}^3$). Данная возможность позволяет улучшить наглядность представления концентрационных профилей на графиках. Необходимость в этом возникает в случае большого (на несколько порядков) перепада концентраций на протяжении исследуемой последовательности дискретных моментов времени.

Кнопка «Сохранить модели в обобщающую модель»  общая для всего раздела «Базовые модели» и предназначена для сохранения обобщающей модели, которая используется на следующем этапе. Для сохранения предварительно необходимо загрузить все 5 моделей (из этих моделей и будет состоять обобщающая), иначе это действие выполнить будет невозможно. Если это условие удовлетворено, то при нажатии на эту кнопку появится форма для сохранения в БД, в которой необходимо указать имя обобщающей модели и нажать на кнопку  .

Так как работа с остальными подразделами во многом схожа с подразделом «Модель 1», далее будут рассмотрены только индивидуальные особенности каждого подраздела.

Модель 2. Пример экранной формы данного подраздела представлен на рис. 3.20.

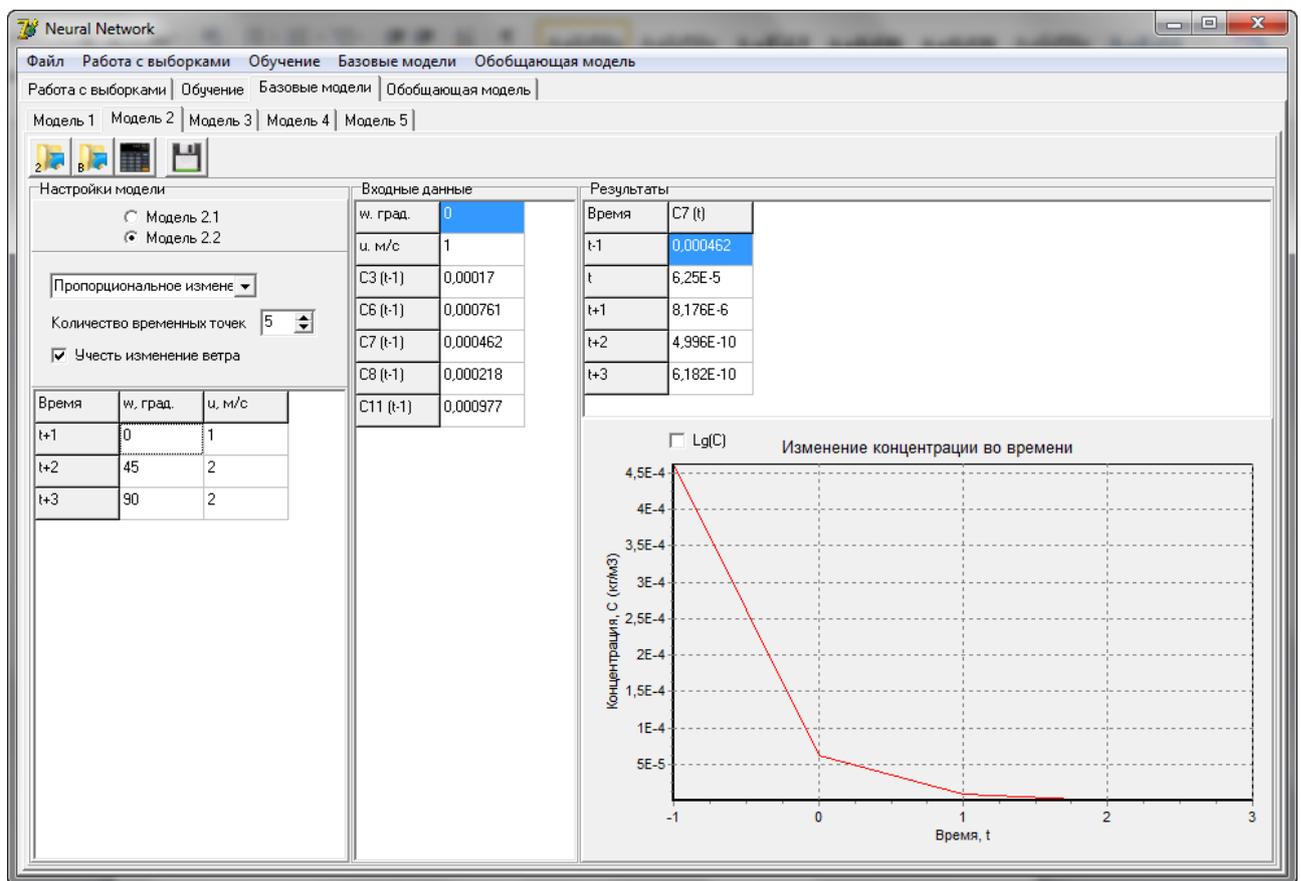


Рис. 3.20. Интерфейс экранной формы «Модель 2»

Особенностью данной модели является то, что можно учесть направление ветра и задать сценарий для переменных метеоусловий (модель 2.1). Для того чтобы задать сценарий изменения метеоусловий, необходимо поставить галочку в поле Учесть изменение ветра при этом в форме «Настройки модели» появится таблица

(рис. 3.20), в которую необходимо ввести сценарий изменения метеоусловий, а именно скорость и направление ветра для каждого дискретного момента времени.

В остальном работа в данном подразделе схожа с предыдущим.

Модель 3. Пример экранной формы этого подраздела представлен на рис. 3.21.

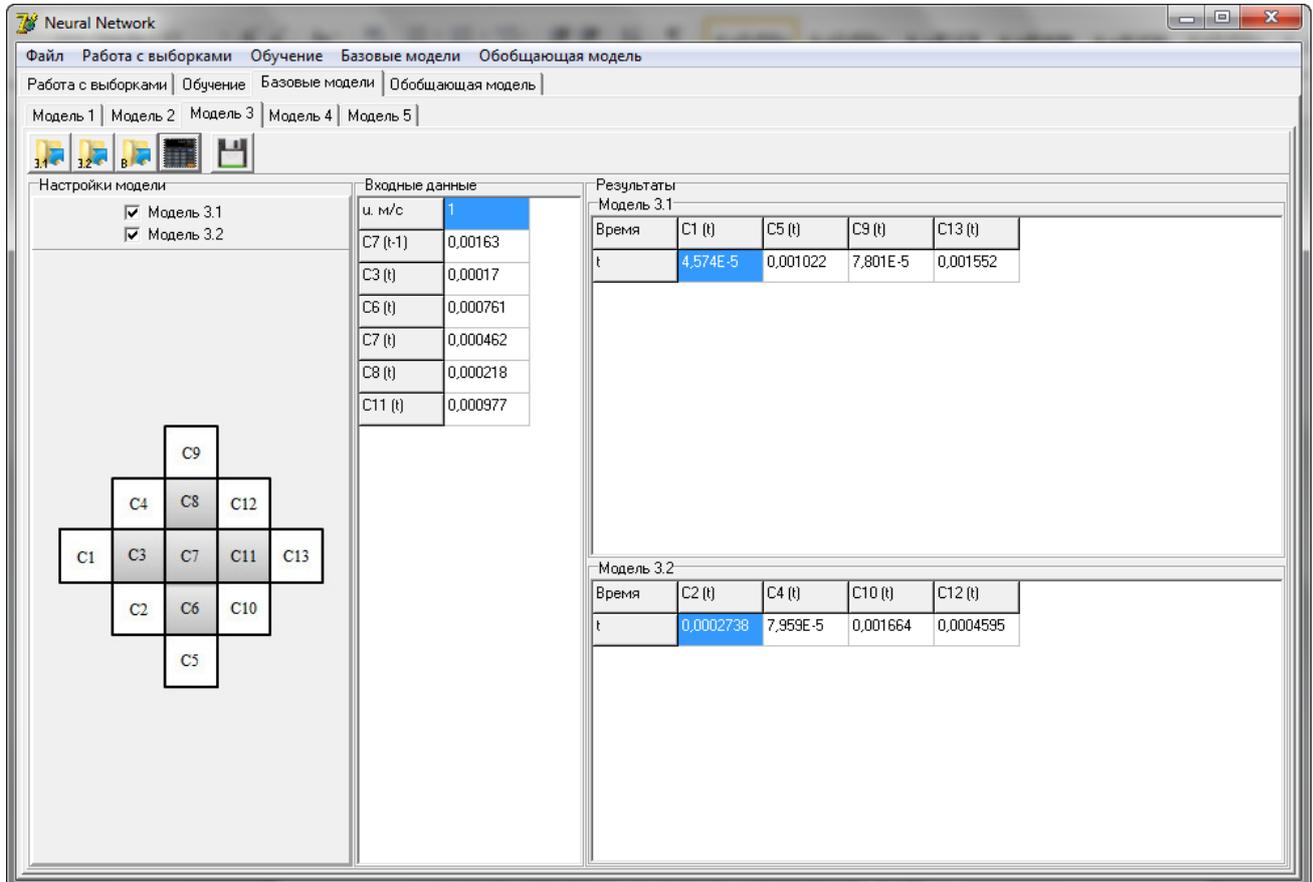


Рис. 3.21. Интерфейс экранной формы «Модель 3»

В данном разделе имеется возможность вести расчет сразу по обеим ЯНМ (моделям 3.1 и 3.2). Чтобы получить результаты по каждой из модели необходимо отметить опции в соответствующих полях (если настройки модели не загружены, то поле не активно) (рис. 3.22).

Модель 3.1
 Модель 3.2

Рис. 3.22. Форма для выбора модели

В зависимости от выбранных моделей изменяется форма «Настройка модели» (изображение, показывающее, для каких смежных ячеек ведется расчет) и

«Результаты». Все возможные варианты представлены на рис. 3.23.

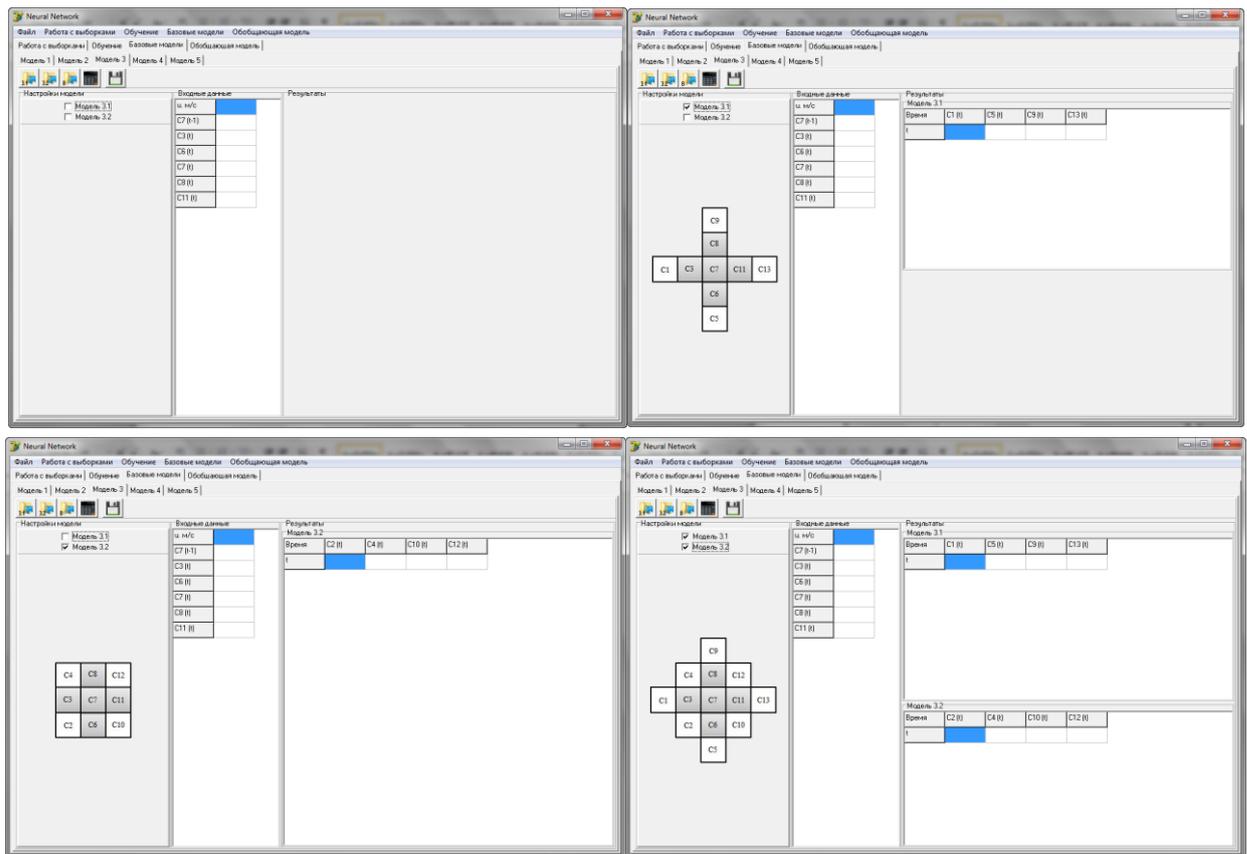


Рис. 3.23. Группа опций для выбора модели

Так как расчет по модели 3 ведется на текущий момент времени, все полученные результаты выводятся в форме таблиц (таблица «Модель 3.1» и «Модель 3.2») (рис. 3.21).

Модель 4. Пример экранной формы данного подраздела представлен на рис. 3.24.

Как видно из рис. 3.24, интерфейс подраздела полностью совпадает с интерфейсом подраздела «Модель 3». Отличаются эти модели входными данными и, как следствие, заложенной в программе методикой расчета результатов.

Модель 5. Пример экранной формы представлен на рис. 3.25.

Работа в данном подразделе аналогична работе с подразделом «Модель 1». Отличие данной модели в том, что ведется расчет концентрации для всех ячеек окрестности фон Неймана, и, как следствие, изменена форма вывода результатов (профили концентрации представляются в виде таблицы и линий на графике для всех ячеек окрестности фон Неймана).

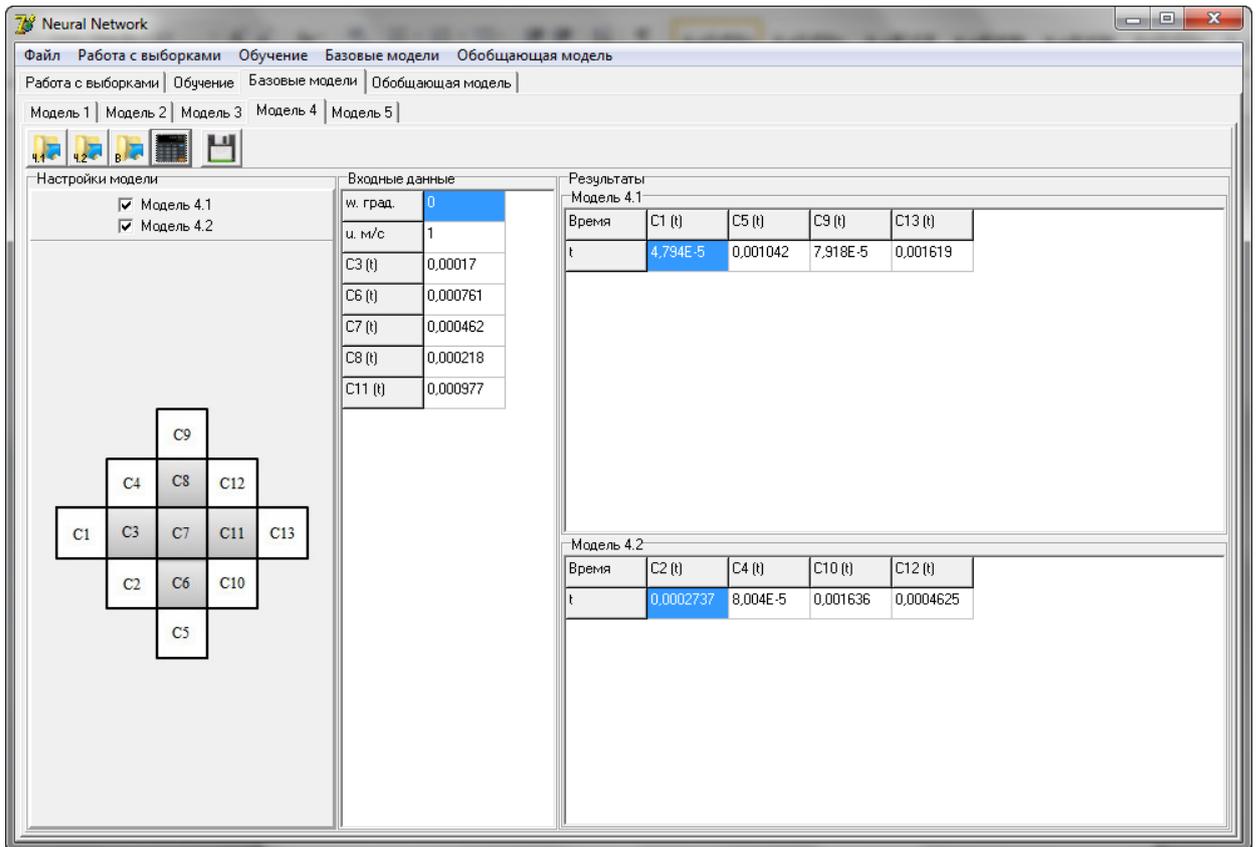


Рис. 3.24. Интерфейс экранной формы «Модель 4»

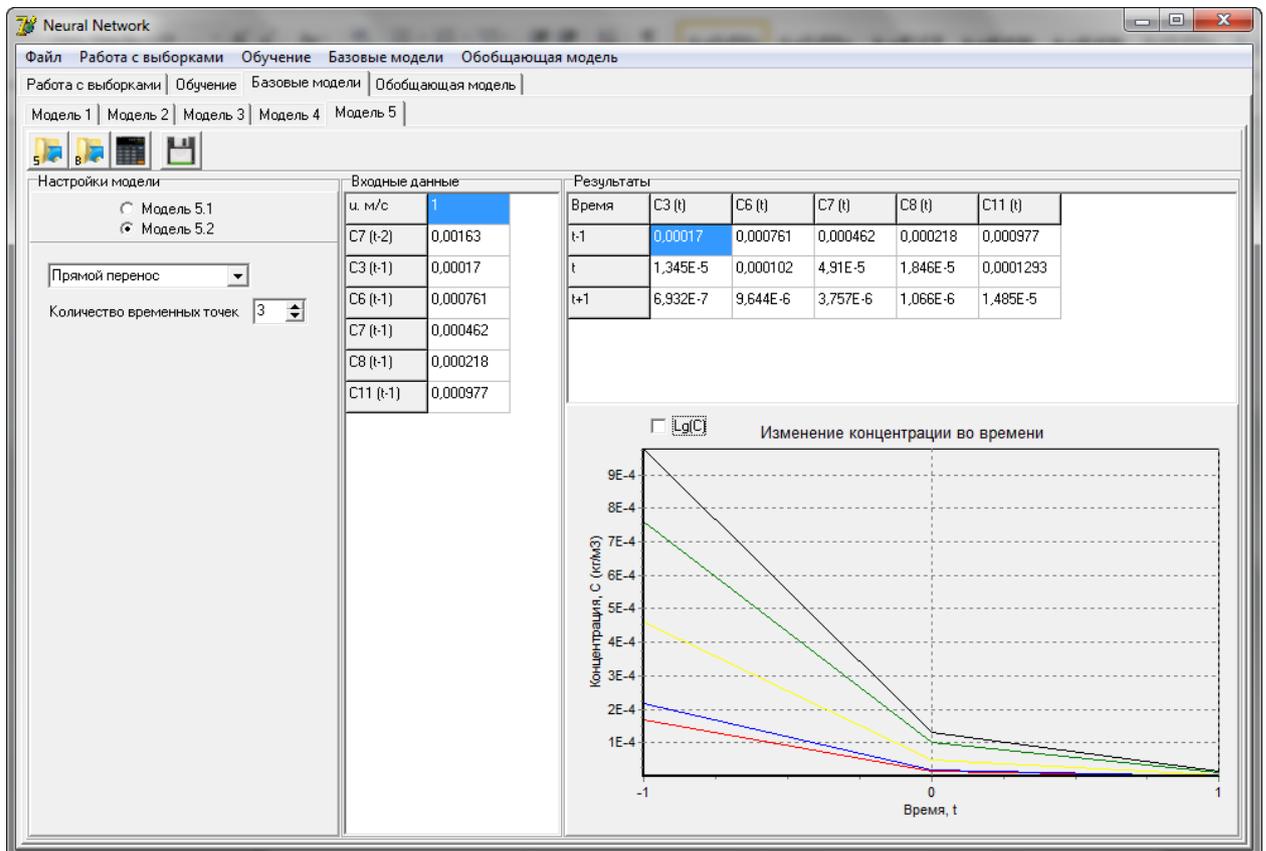


Рис. 3.25. Интерфейс экранной формы «Модель 5»

Обобщающая модель. Предназначена для расчета и построения полей концентрации в табличной и графической форме в различные моменты времени и получения токсодоз, профилей концентрации во времени и пространстве для любой точки местности.

Экранная форма раздела при запуске программы представлена на рис. 3.26.

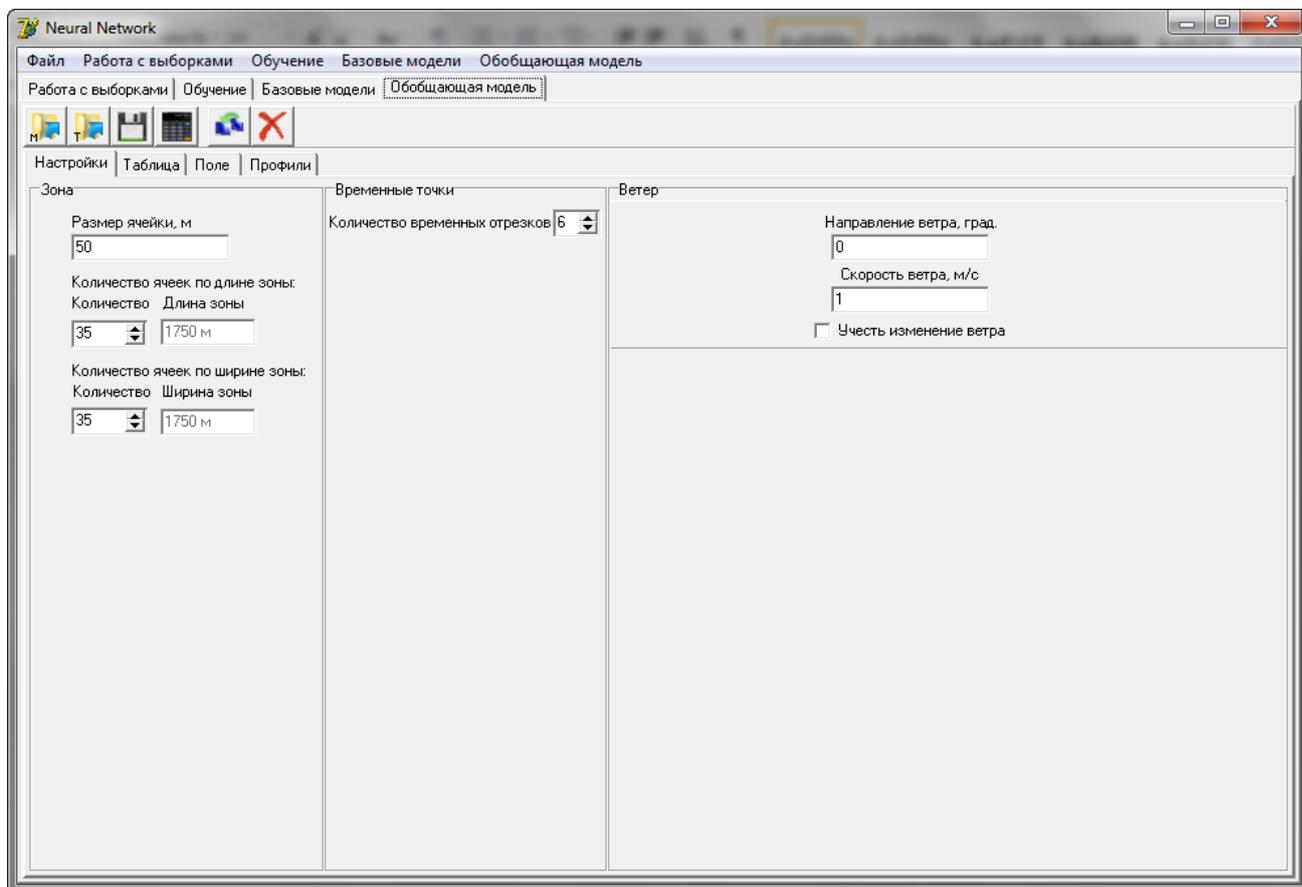


Рис. 3.26. Интерфейс экранной формы «Обобщающая модель» при запуске информационной системы «ЯНСКА»

На панели инструментов расположено шесть кнопок: «Загрузить обобщающую модель» , «Загрузить таблицу» , «Сохранить таблицу» , «Рассчитать» , «Принять настройки и перейти к моделированию» , «Очистить таблицу и изменить настройки» .

Обобщающая модель делится на четыре подраздела, каждый из которых находится на своей вкладке программы. Данный раздел состоит из подразделов «Настройки», «Таблица», «Поле» и «Профили».

Для начала моделирования необходимо загрузить обобщающую модель, нажав на кнопку «Загрузить обобщающую модель»  и выбрав необходимое имя модели в появившейся форме загрузки из БД.

Далее возможно два развития событий: ручной ввод настроек и данных в таблицу, и второй – загрузка настроек и данных из файла.

При ручном вводе настроек и данных в таблицу, первым делом необходимо задать все настройки моделирования (рис. 3.27), а именно настройки зоны, количество временных отрезков и параметры ветра. Зона определяется размером ячейки, который задается в метрах в соответствующее поле, и количеством этих ячеек по ширине и длине зоны, задаваемые с помощью счетчика целых чисел [1]. Длина и ширина зоны при этом рассчитываются автоматически и заносятся в соответствующие поля.

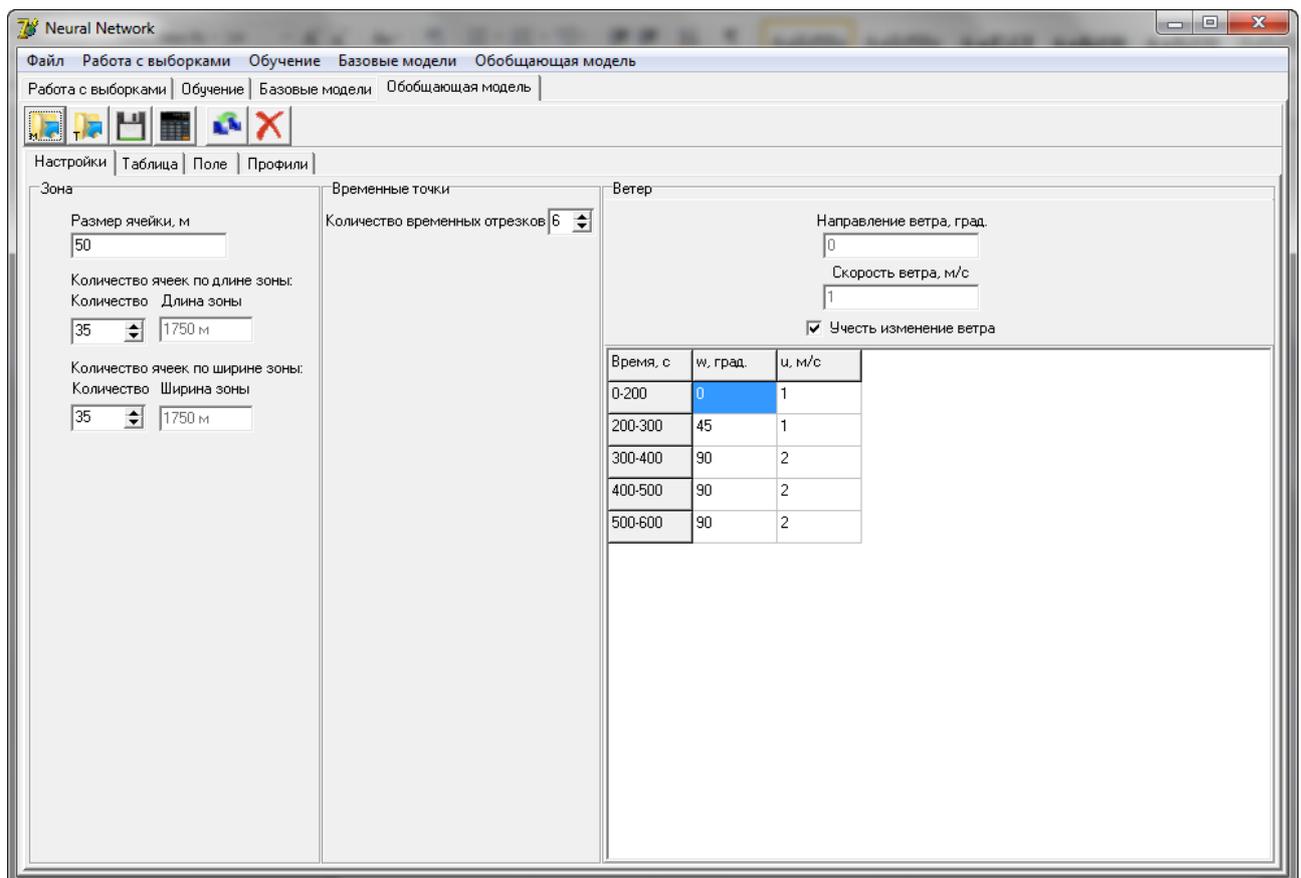


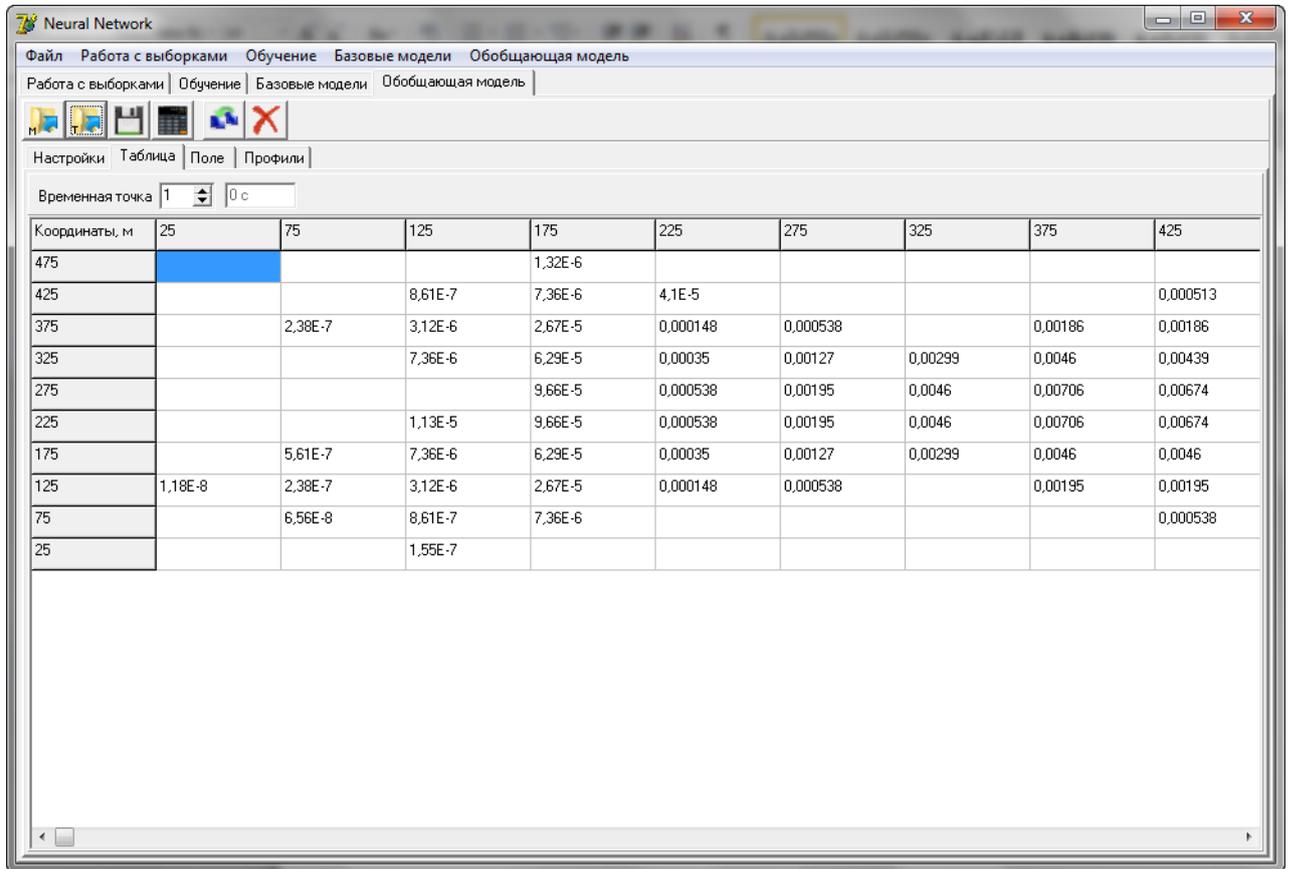
Рис. 3.27. Интерфейс экранной формы «Настройки»

Количество временных отрезков также задается с помощью счетчика целых чисел [1]. Данный параметр определяет, на сколько моментов времени вперед будет рассчитана мгновенная зона.

При настройке параметров ветра возможны два случая: постоянные и переменные метеоусловия. Для того чтобы задать сценарий изменения метеоусловий необходимо поставить галочку в поле Учесть изменение ветра. При выполнении этого действия появляется таблица, в которую необходимо ввести направление и скорость

ветра для каждого отрезка времени (рис. 3.27).

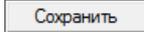
Для перехода к вводу исходных данных и принятию настроек необходимо нажать кнопку «Принять настройки и перейти к моделированию» . При этом программа автоматически сформирует экранную форму в подразделе «Таблица» и перейдет к нему (рис. 3.28).



| Координаты, м | 25 | 75 | 125 | 175 | 225 | 275 | 325 | 375 | 425 |
|---------------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|---------|---------|----------|
| 475 | | | | 1,32E-6 | | | | | |
| 425 | | | 8,61E-7 | 7,36E-6 | 4,1E-5 | | | | 0,000513 |
| 375 | | 2,38E-7 | 3,12E-6 | 2,67E-5 | 0,000148 | 0,000538 | | 0,00186 | 0,00186 |
| 325 | | | 7,36E-6 | 6,29E-5 | 0,00035 | 0,00127 | 0,00299 | 0,0046 | 0,00439 |
| 275 | | | | 9,66E-5 | 0,000538 | 0,00195 | 0,0046 | 0,00706 | 0,00674 |
| 225 | | | 1,13E-5 | 9,66E-5 | 0,000538 | 0,00195 | 0,0046 | 0,00706 | 0,00674 |
| 175 | | 5,61E-7 | 7,36E-6 | 6,29E-5 | 0,00035 | 0,00127 | 0,00299 | 0,0046 | 0,0046 |
| 125 | 1,18E-8 | 2,38E-7 | 3,12E-6 | 2,67E-5 | 0,000148 | 0,000538 | | 0,00195 | 0,00195 |
| 75 | | 6,56E-8 | 8,61E-7 | 7,36E-6 | | | | | 0,000538 |
| 25 | | | 1,55E-7 | | | | | | |

Рис. 3.28. Интерфейс экранной формы «Таблица»

В данном подразделе в таблицу вводятся исходные данные, а именно концентрации в единицах измерения $\text{кг}/\text{м}^3$, для каждой ячейки зоны прогнозирования в определенный момент времени. Координаты в таблице определяют центр ячейки. Для перехода между временными точками используется счетчик целых чисел , расположенный вверху рабочего поля (рис. 3.28).

Для сохранения текущих настроек и исходных данных, занесенных в таблицу, требуется нажать кнопку «Сохранить таблицу»  и в появившемся окне указать имя файла с разрешением *.txt и нажать кнопку .

Для того чтобы загрузить настройки моделирования и исходные данные, необходимо нажать кнопку «Загрузить таблицу» , и в появившейся форме выбрать нужный файл.

Для изменения настроек, очистки таблицы и перехода к подразделу «Настройки» требуется нажать кнопку «Очистить таблицу и изменить настройки» .

Для расчета и построения поля концентрации необходимо нажать кнопку «Расчитать» . При этом для каждой временной точки в таблицу заносятся все недостающие данные, и строится поле концентрации на соответствующей вкладке программы «Поле» (рис. 3.29).

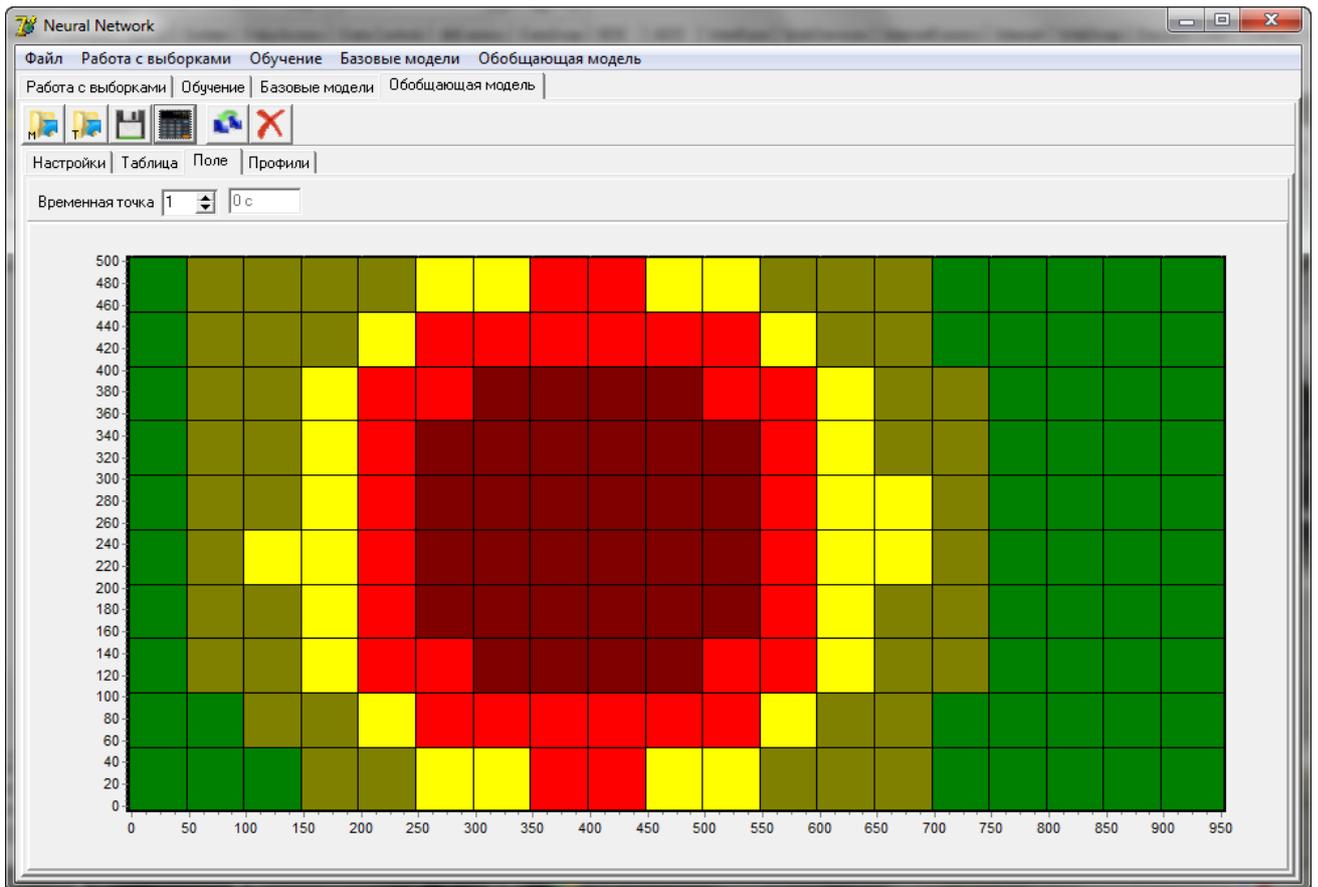


Рис. 3.29. Интерфейс экранной формы «Поле»

Для перехода между временными точками, аналогично подразделу «Таблица», используется счетчик целых чисел , расположенный вверху рабочего поля (рис. 3.29).

Последний подраздел «Профили» предназначен для отображения токсодозы и профилей концентрации во времени и пространстве в виде графиков (рис. 3.30). Переход между графиками организован при помощи панели вкладок.

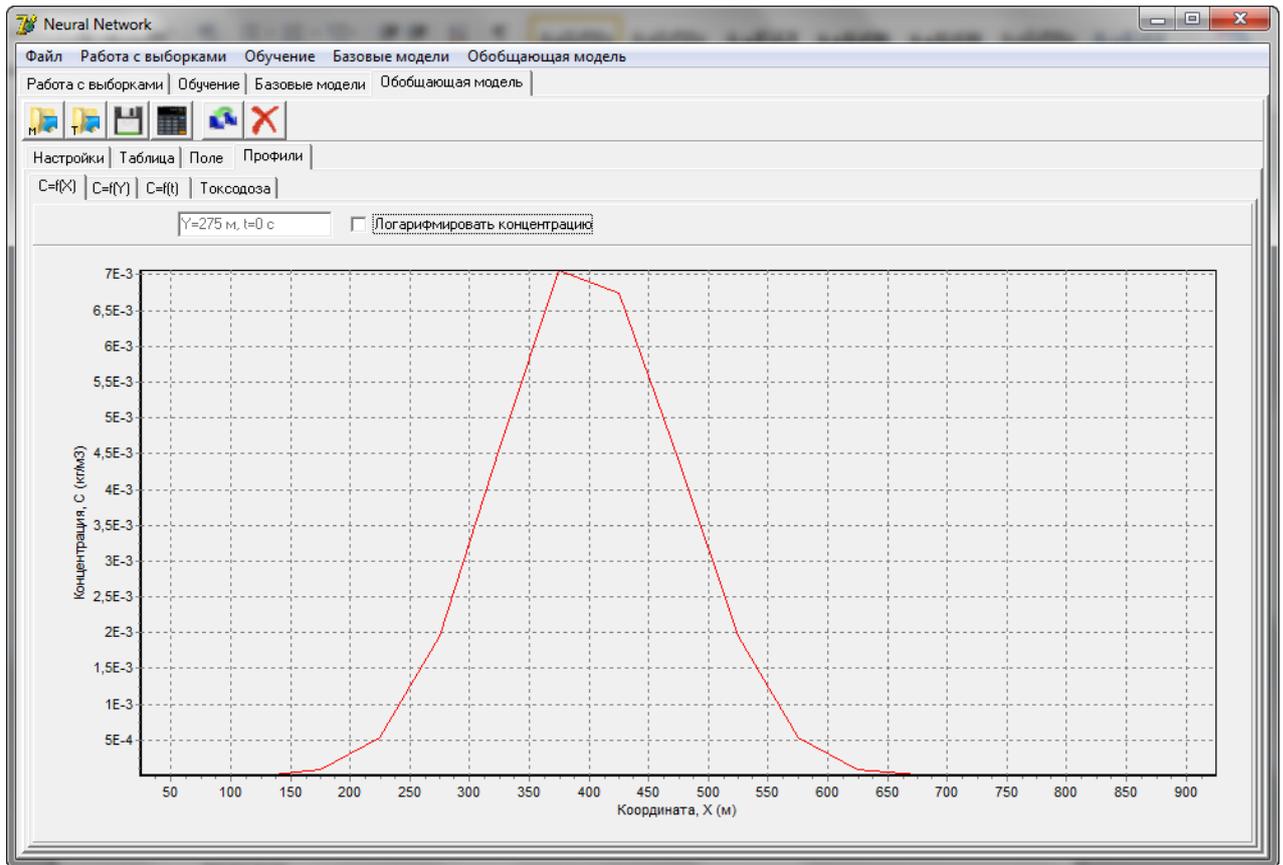


Рис. 3.30. Интерфейс экранной формы «Профили».

Профиль концентрации по длине зоны

Для получения графиков в определенной точке необходимо во вкладке «Таблица» нажать на ячейку, для координаты которой и будут построены все возможные графики в подразделе «Профили».

Вверху формы «Профили» (рис. 3.30), расположено поле, в котором отображаются данные о точке пространства и времени, так как их невозможно определить по графику.

Для перехода к логарифмированной шкале концентрации необходимо поставить галочку в поле Логарифмировать концентрацию, расположенную вверху формы представленной на рис. 3.30.

Остальные возможные экранные формы подраздела «Профили» представлены на рис. 3.31 – 3.33.

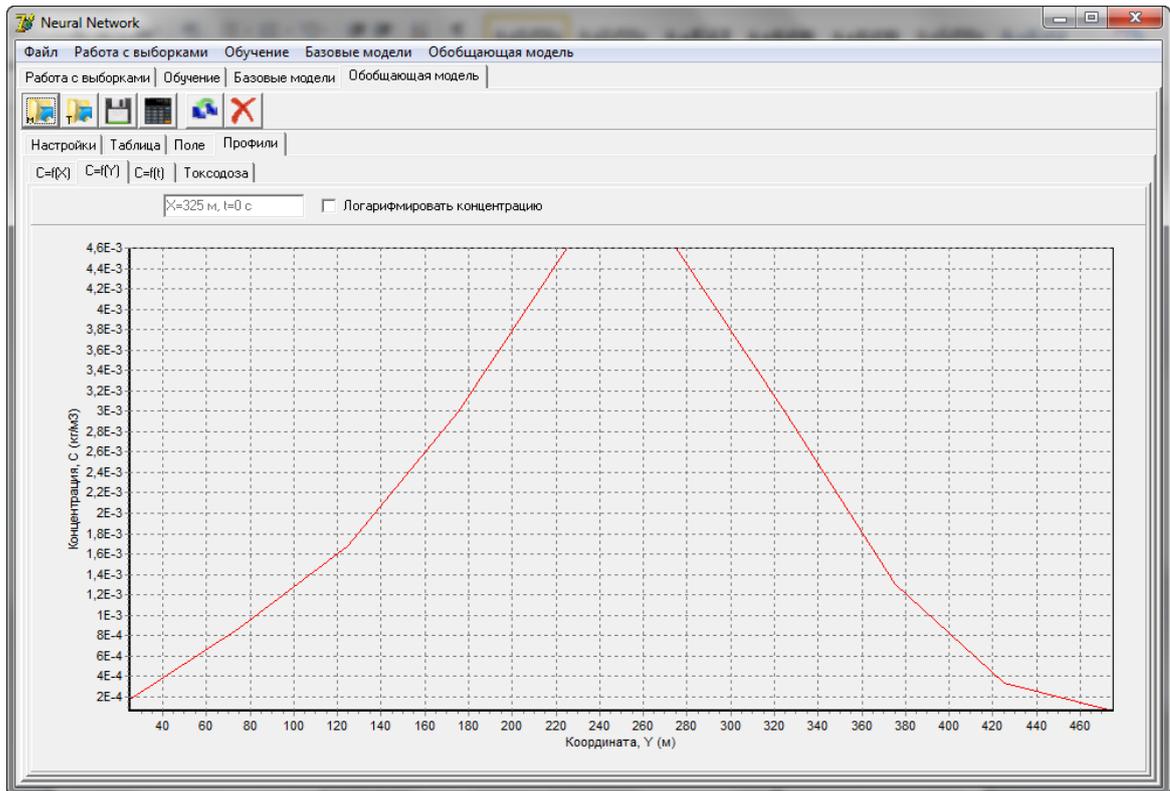


Рис. 3.31. Интерфейс экранной формы «Профили».
Профиль концентрации по ширине зоны

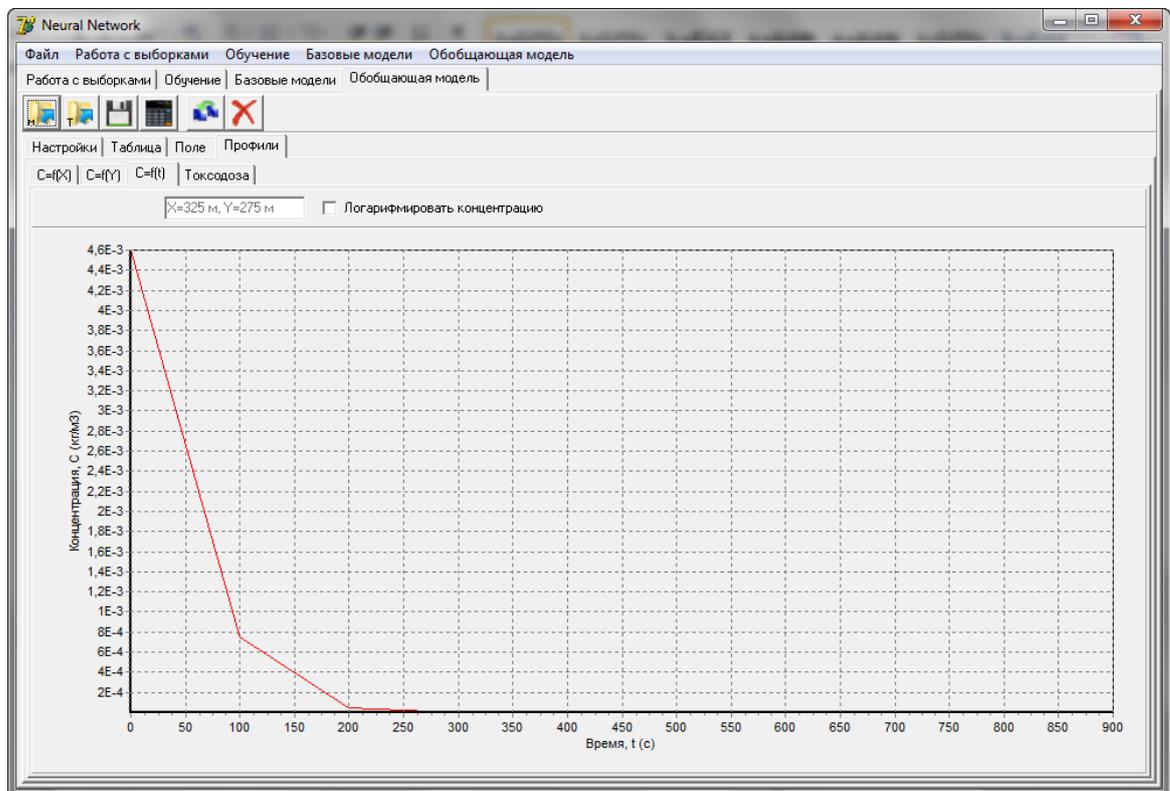


Рис. 3.32. Интерфейс экранной формы «Профили».
Профиль концентрации во времени

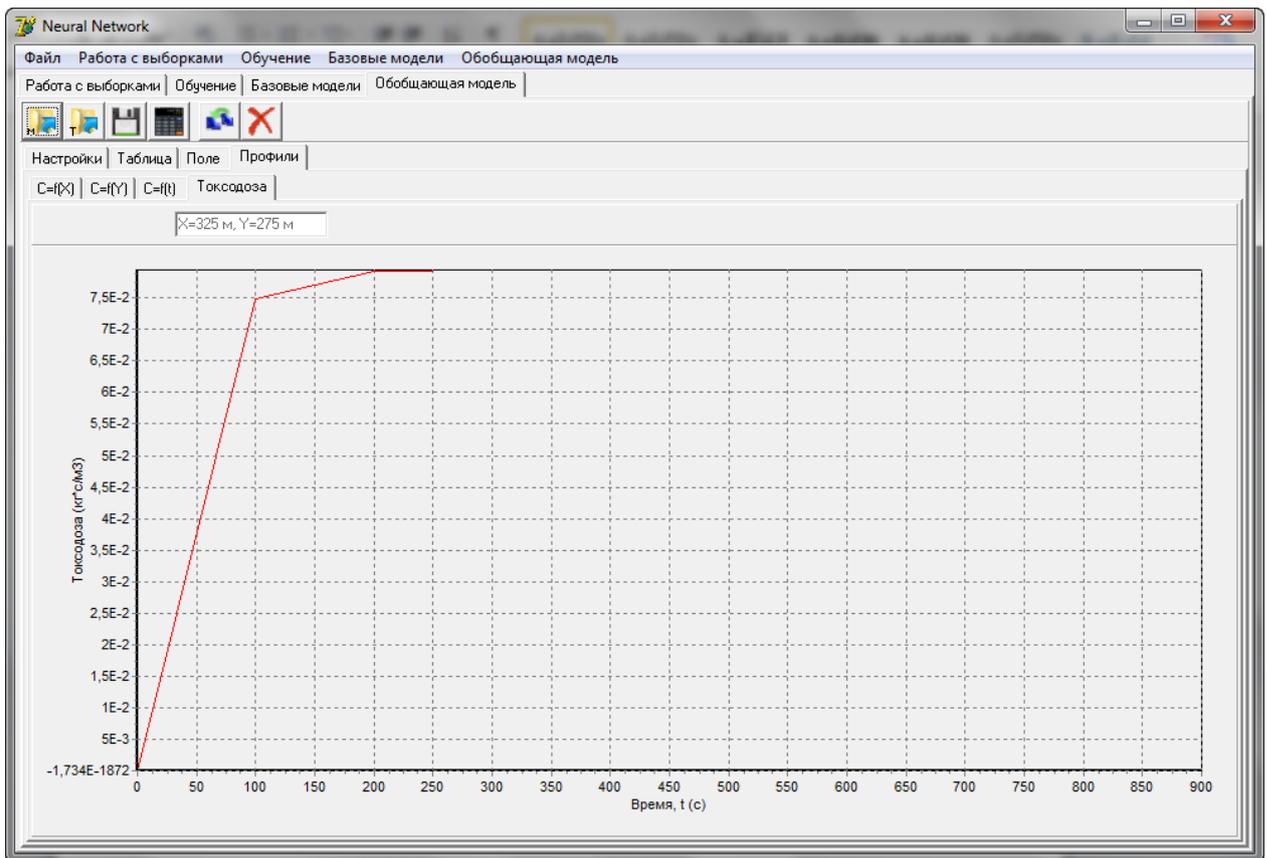


Рис. 3.33. Интерфейс экранной формы «Профили». Токсодоза

3.6. Выводы

В результате разработки ячеечно-нейросетевой системы компьютерного анализа последствий аварийного загрязнения атмосферы промышленными источниками можно заключить:

1. Разработана организационная структура ИС «ЯНСКА». Определены составы технических и программных средств, задействованных в системе.
2. Разработаны функциональная структура ИС «ЯНСКА» и функциональные структуры ее отдельных подсистем. Определены задачи и функции подсистем и системы в целом, необходимые для достижения основных целей ее использования в случае промышленных аварий с выбросом ОХВ.
3. Разработаны информационно-логическая и даталогическая модели данных, заложенные в структуру БД ИС «ЯНСКА», определены типы и источники используемых данных.
4. Исследованы и адаптированы к использованию в ИС «ЯНСКА» компьютерные методы визуализации информации и принципы проектирования пользовательского интерфейса. Предложены методы синхронизации изменений результатов, интерактивной многосвязности и интеграции с

внешними картографическими данными, учитывающие специфику предметной области решения задач экологической безопасности с использованием специализированных компьютерных средств и позволяющие повысить функциональность системы, а также оперативность и эффективность принимаемых с ее помощью решений.

5. На основе изложенных принципов и методов спроектирован интерфейс пользователя ИС «ЯНСКА».
6. Предложено алгоритмическое обеспечение интеллектуальной поддержки принятия решений с использованием ИС «ЯНСКА».
7. Представлены примеры программной реализации основных сценариев визуализации, трансформации и компьютерного анализа результатов оценки последствий промышленных химических аварий в ИС «ЯНСКА».

Глава 4. Использование информационной системы «ЯНСКА» для компьютерного анализа последствий аварийного загрязнения атмосферы промышленными источниками

4.1. Оценка последствий аварийного выброса для гипотетического промышленного источника с использованием информационной системы «ЯНСКА»

Исходные данные и их подготовка к моделированию

Все данные для обучения и тестирования ИНС были получены с помощью модуля программы ТОКСИ+Risk, реализующего методики ТОКСИ-2 и ТОКСИ-3 (рис. 4.1).

Рис. 4.1. Окно модуля, реализующего методики ТОКСИ-2 и ТОКСИ-3

Данный модуль разработан для моделирования аварий по различным сценариям (разлив ОХВ или выброс газа с различными вариантами степеней разрушений) и для проведения расчетов по заданным сценариям, параметрам и метеоусловиям по методикам ТОКСИ-2 и ТОКСИ-3.

Для получения обучающей и тестовой выборок использовались следующие параметры аварии:

- ОХВ – аммиак;

- сценарий – газ, полное разрушение оборудования;
- масса ОХВ – 29 т;
- тип местности – город;
- температура поверхности местности – 20° С;
- параметры оборудования:
 - давление в емкости – 4 атм;
 - температура в оборудовании – 0° С;
- параметры атмосферы и ветра:
 - температура воздуха – 20° С;
 - скорость ветра – 0,5, 1, 2 и 5 м/с;
 - высота для скорости ветра – 10 м;

Все измерения концентрации ОХВ проводились на высоте 2 м.

Для расчета в модуле программы ТОКСИ+Risk предварительно необходимо ввести все исходные данные в соответствующие им поля (рис. 4.1), задать скорость ветра и выбрать класс устойчивости атмосферы, согласно рис. 4.2.

| Скорость ветра, м/с | День* | | | | Сумерки** | Ночь | | |
|---------------------|---|---------------------|---------------|---------------------|-----------|-----------------------------------|-----|---|
| | Интенсивность солнечного излучения, Вт/м ² | | | | | Уровень облачности (восьмые доли) | | |
| | Сильная (>600) | Умеренная (300-600) | Слабая (<300) | Сплошная облачность | | 0-3 | 4-7 | 8 |
| <=2 | A | A | B | C | D | F | F | D |
| 2-3 | A | B | C | C | D | F | E | D |
| 3-5 | B | B | C | C | D | E | D | D |
| 5-6 | C | C | D | D | D | D | D | D |
| >=6 | C | D | D | D | D | D | D | D |

* День - период времени, за исключением 1 ч. после восхода солнца и 1 ч. до заката.
 ** Сумерки включают в себя 1 ч. после восхода солнца и 1 ч. до заката.

Рис. 4.2. Классы устойчивости атмосферы

Далее, в зависимости от методики, которую необходимо использовать, ставится или снимается флажок «Использовать ТОКСИ-3» для расчета по методике ТОКСИ-3 или ТОКСИ-2 соответственно (в данной диссертационной работе использовалась методика ТОКСИ-3).

Основным этапом получения данных для обучающих и тестовых примеров было расположение датчиков на расчетной зоне, которые фиксировали концентрацию в точке каждые 100 секунд. Расчетная зона была условно разбита на «ячейки», в центре которых были расположены датчики. Всего было расположено 520 датчиков. Пример окна программы с нанесенными на расчетную зону датчиками представлен на рис. 4.3.

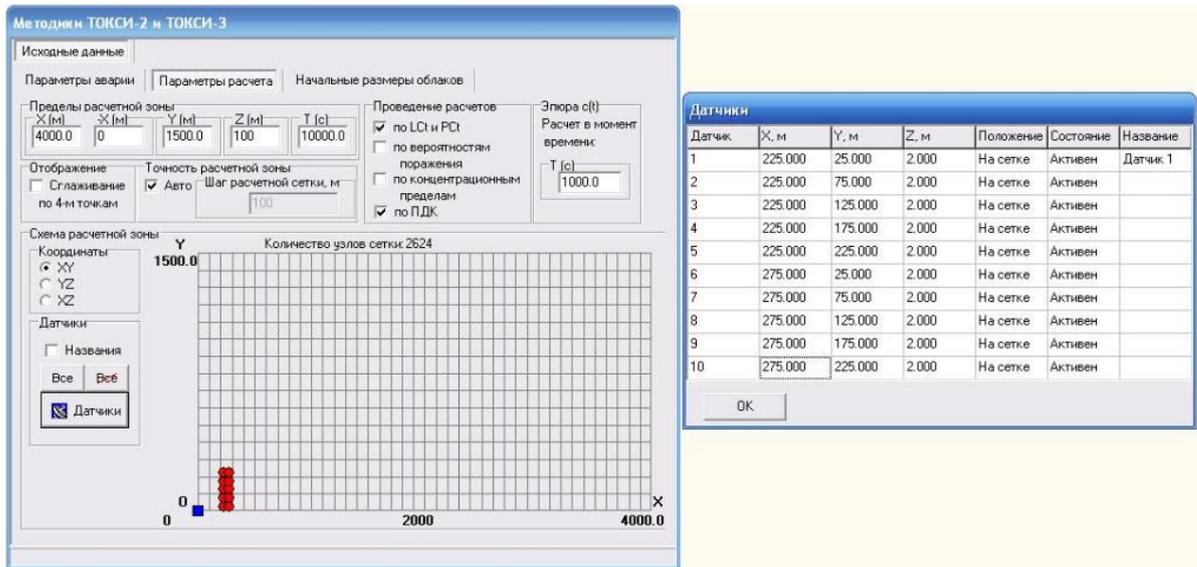


Рис. 4.3. Окно модуля программы ТОКСИ+Risk «Параметры расчета»

При нажатии на кнопку «Расчет» автоматически производится расчет модели и переход на вкладку «Результаты расчета», где приведены основные результаты расчета. Всего было проведено 52 расчета (по 13 на каждую скорость ветра), так как программа позволяет за 1 раз расположить только 10 датчиков. Все необходимые данные для получения обучающих и тестовых примеров были сохранены в таблицах Excel, с помощью встроенной в модуль функции.

С помощью этих таблиц данных была составлена универсальная обучающая выборка. Универсальна эта выборка тем, что из нее можно легко составить обучающие и тестовые примеры для различных ЯНМ, которые, в свою очередь, необходимы для решения различных задач прогнозирования.

Универсальная выборка состоит из 360 примеров для четырех направлений ветра (0 град., 90 град., 180 град. и 270 град.) и для четырех скоростей ветра (0,5, 1, 2 и 5 м/с).

В таблице 4.1. представлена часть универсальной выборки (для скорости ветра 0,5 м/с и направлении ветра 0 град.) (полная таблица – см. Приложение 1). В этой таблице:

- w – направление ветра, град.;
- u – скорость ветра, м/с;
- $C_7(\tau-2)$ – концентрация в центральной ячейке на два предшествующих дискретных момента времени назад;
- $C_i(\tau-1)$ – концентрация в ячейках в предшествующий момент времени, $i = \{3, 6, 7, 8, 11\}$;
- $C_j(\tau)$ – концентрация в ячейках в текущий момент времени, $j = \overline{1, 13}$.

Таблица 4.1

Фрагмент универсальной выборки для скорости ветра 0,5 м/с и направления ветра 0 градусов

| w, град. | u, м/с | C7 (t-2) | C3 (t-1) | C6 (t-1) | C7 (t-1) | C8 (t-1) | C11 (t-1) | C1 (t) | C2 (t) | C3 (t) | C4 (t) | C5 (t) | C6 (t) | C7 (t) | C8 (t) | C9 (t) | C10 (t) | C11 (t) | C12 (t) | C13 (t) |
|----------|--------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0 | 0,5 | 3,65E-08 | 1,64E-10 | 3,26E-08 | 6,67E-09 | 8,02E-10 | 1,60E-07 | 4,21E-13 | 1,15E-10 | 2,84E-11 | 4,37E-12 | 1,24E-08 | 4,87E-09 | 1,20E-09 | 1,84E-10 | 1,78E-11 | 1,29E-07 | 3,16E-08 | 4,87E-09 | 5,23E-07 |
| 0 | 0,5 | 2,15E-07 | 1,68E-09 | 3,46E-08 | 3,46E-08 | 2,47E-08 | 5,09E-07 | 9,45E-12 | 2,69E-10 | 2,69E-10 | 1,98E-10 | 4,16E-09 | 5,64E-09 | 5,64E-09 | 4,16E-09 | 2,26E-09 | 8,73E-08 | 8,73E-08 | 6,44E-08 | 9,96E-07 |
| 0 | 0,5 | 2,39E-06 | 4,55E-10 | 3,60E-07 | 1,18E-07 | 1,28E-08 | 1,01E-05 | 2,98E-14 | 5,51E-11 | 2,15E-11 | 3,28E-12 | 1,55E-08 | 1,55E-08 | 6,05E-09 | 9,24E-10 | 5,51E-11 | 1,70E-06 | 6,65E-07 | 1,02E-07 | 2,86E-05 |
| 0 | 0,5 | 1,01E-07 | 2,19E-09 | 1,26E-08 | 2,67E-08 | 4,41E-08 | 2,54E-07 | 3,85E-11 | 3,00E-10 | 5,95E-10 | 9,39E-10 | 1,48E-09 | 3,69E-09 | 7,32E-09 | 1,16E-08 | 1,45E-08 | 3,62E-08 | 7,18E-08 | 1,13E-07 | 5,60E-07 |
| 0 | 0,5 | 2,33E-06 | 2,88E-09 | 4,65E-08 | 1,87E-07 | 3,74E-07 | 6,04E-06 | 2,32E-12 | 8,71E-11 | 2,91E-10 | 5,33E-10 | 9,75E-10 | 5,97E-09 | 2,00E-08 | 3,65E-08 | 3,65E-08 | 2,23E-07 | 7,47E-07 | 1,37E-06 | 1,53E-05 |
| 0 | 0,5 | 3,37E-06 | 1,01E-07 | 1,58E-06 | 9,10E-07 | 3,99E-07 | 6,26E-06 | 2,19E-09 | 4,41E-08 | 2,67E-08 | 1,26E-08 | 5,37E-07 | 4,18E-07 | 2,54E-07 | 1,20E-07 | 4,41E-08 | 3,09E-06 | 1,88E-06 | 8,86E-07 | 1,08E-05 |
| 0 | 0,5 | 1,01E-05 | 2,60E-07 | 7,32E-05 | 4,36E-06 | 1,02E-07 | 2,86E-05 | 7,47E-10 | 4,67E-07 | 4,18E-08 | 1,67E-09 | 5,83E-05 | 1,17E-05 | 1,04E-06 | 4,18E-08 | 7,47E-10 | 1,30E-04 | 1,17E-05 | 4,67E-07 | 5,83E-05 |
| 0 | 0,5 | 3,47E-12 | 2,03E-07 | 1,20E-05 | 2,64E-08 | 7,59E-12 | 4,48E-10 | 1,65E-07 | 1,32E-04 | 2,39E-06 | 1,13E-08 | 7,29E-03 | 2,23E-04 | 1,64E-06 | 2,33E-09 | 6,47E-13 | 4,33E-05 | 3,18E-07 | 4,54E-10 | 1,20E-08 |
| 0 | 0,5 | 6,57E-02 | 4,89E-08 | 5,38E-06 | 5,93E-04 | 5,93E-04 | 6,53E-02 | 6,68E-17 | 2,00E-12 | 6,21E-11 | 6,21E-11 | 6,21E-11 | 5,98E-08 | 1,86E-06 | 1,86E-06 | 5,98E-08 | 5,77E-05 | 1,79E-03 | 1,79E-03 | 5,56E-02 |
| 0 | 0,5 | 3,81E-05 | 9,57E-07 | 2,93E-06 | 8,98E-06 | 1,89E-05 | 5,79E-05 | 1,26E-08 | 6,78E-08 | 1,86E-07 | 3,64E-07 | 1,86E-07 | 7,12E-07 | 1,95E-06 | 3,82E-06 | 5,35E-06 | 5,35E-06 | 1,47E-05 | 2,87E-05 | 7,87E-05 |
| 0 | 0,5 | 7,05E-04 | 3,18E-07 | 2,23E-04 | 4,33E-05 | 1,64E-06 | 1,15E-03 | 1,41E-11 | 4,32E-08 | 1,13E-08 | 7,81E-10 | 9,09E-06 | 9,09E-06 | 2,39E-06 | 1,65E-07 | 2,98E-09 | 5,03E-04 | 1,32E-04 | 9,09E-06 | 1,91E-03 |
| 0 | 0,5 | 4,32E-34 | 8,78E-08 | 1,02E-10 | 1,17E-13 | 1,57E-19 | 1,81E-22 | 5,93E-04 | 6,53E-02 | 5,93E-04 | 4,89E-08 | 5,93E-04 | 5,93E-04 | 5,38E-06 | 4,44E-10 | 3,32E-16 | 4,89E-08 | 4,44E-10 | 3,66E-14 | 3,32E-16 |
| 0 | 0,5 | 7,46E-05 | 3,97E-06 | 1,78E-05 | 2,29E-05 | 2,29E-05 | 1,03E-04 | 1,42E-07 | 8,83E-07 | 1,11E-06 | 1,11E-06 | 3,47E-06 | 5,48E-06 | 6,89E-06 | 6,89E-06 | 5,48E-06 | 2,71E-05 | 3,40E-05 | 3,40E-05 | 1,34E-04 |
| 0 | 0,5 | 1,35E-04 | 1,35E-05 | 6,27E-05 | 5,17E-05 | 3,52E-05 | 1,64E-04 | 9,37E-07 | 5,52E-06 | 4,62E-06 | 3,24E-06 | 2,28E-05 | 2,28E-05 | 1,91E-05 | 1,34E-05 | 7,87E-06 | 7,89E-05 | 6,61E-05 | 4,64E-05 | 1,92E-04 |
| 0 | 0,5 | 1,38E-09 | 7,32E-05 | 6,65E-07 | 1,70E-06 | 1,70E-06 | 1,55E-08 | 7,29E-03 | 6,52E-04 | 1,46E-03 | 1,46E-03 | 1,17E-05 | 5,83E-05 | 1,30E-04 | 1,30E-04 | 5,83E-05 | 2,33E-06 | 5,22E-06 | 5,22E-06 | 9,34E-08 |
| 0 | 0,5 | 1,29E-03 | 1,43E-04 | 1,49E-03 | 5,84E-04 | 1,43E-04 | 1,49E-03 | 4,75E-06 | 8,76E-05 | 3,81E-05 | 1,09E-05 | 7,03E-04 | 4,63E-04 | 2,02E-04 | 5,78E-05 | 1,09E-05 | 1,62E-03 | 7,03E-04 | 2,02E-04 | 1,62E-03 |
| 0 | 0,5 | 2,57E-13 | 9,18E-05 | 2,03E-07 | 2,03E-07 | 2,64E-08 | 5,83E-11 | 3,03E-02 | 5,89E-03 | 5,89E-03 | 1,15E-03 | 4,33E-05 | 2,23E-04 | 2,23E-04 | 4,33E-05 | 1,64E-06 | 1,64E-06 | 1,64E-06 | 3,18E-07 | 2,33E-09 |
| 0 | 0,5 | 2,41E-03 | 2,16E-04 | 5,91E-04 | 8,27E-04 | 8,27E-04 | 2,27E-03 | 8,39E-06 | 3,84E-05 | 5,21E-05 | 5,21E-05 | 9,57E-05 | 1,76E-04 | 2,39E-04 | 2,39E-04 | 1,76E-04 | 5,95E-04 | 8,06E-04 | 8,06E-04 | 2,01E-03 |
| 0 | 0,5 | 1,87E-07 | 1,71E-04 | 2,80E-05 | 1,53E-05 | 4,57E-06 | 7,47E-07 | 3,72E-03 | 2,19E-03 | 1,29E-03 | 4,48E-04 | 4,48E-04 | 4,48E-04 | 2,64E-04 | 9,15E-05 | 1,87E-05 | 5,39E-05 | 3,18E-05 | 1,10E-05 | 2,25E-06 |
| 0 | 0,5 | 1,46E-03 | 7,85E-04 | 1,95E-04 | 1,57E-03 | 6,32E-03 | 1,57E-03 | 5,12E-05 | 5,12E-05 | 3,13E-04 | 1,05E-03 | 1,53E-05 | 1,71E-04 | 1,05E-03 | 3,51E-03 | 6,42E-03 | 3,13E-04 | 1,92E-03 | 6,42E-03 | 1,92E-03 |
| 0 | 0,5 | 4,44E-03 | 1,48E-03 | 3,69E-03 | 2,72E-03 | 1,48E-03 | 3,69E-03 | 2,24E-04 | 8,89E-04 | 6,75E-04 | 3,89E-04 | 2,03E-03 | 2,03E-03 | 1,54E-03 | 8,89E-04 | 3,89E-04 | 3,52E-03 | 2,67E-03 | 1,54E-03 | 3,52E-03 |
| 0 | 0,5 | 7,32E-05 | 1,46E-03 | 3,26E-03 | 6,52E-04 | 5,83E-05 | 1,30E-04 | 7,85E-04 | 6,32E-03 | 1,57E-03 | 1,95E-04 | 1,27E-02 | 6,32E-03 | 1,57E-03 | 1,95E-04 | 1,21E-05 | 3,15E-03 | 7,85E-04 | 9,75E-05 | 1,95E-04 |
| 0 | 0,5 | 1,49E-03 | 5,63E-03 | 5,63E-03 | 3,72E-03 | 1,62E-03 | 1,62E-03 | 3,51E-03 | 7,39E-03 | 5,09E-03 | 2,41E-03 | 7,39E-03 | 7,39E-03 | 5,09E-03 | 2,41E-03 | 7,89E-04 | 5,09E-03 | 3,51E-03 | 1,66E-03 | 1,66E-03 |
| 0 | 0,5 | 5,98E-08 | 3,80E-03 | 1,55E-06 | 2,81E-04 | 3,80E-03 | 1,55E-06 | 7,05E-04 | 9,18E-05 | 5,41E-03 | 4,16E-02 | 2,03E-07 | 9,18E-05 | 5,41E-03 | 4,16E-02 | 4,16E-02 | 1,20E-05 | 7,05E-04 | 5,41E-03 | 1,20E-05 |
| 0 | 0,5 | 2,81E-04 | 5,41E-03 | 9,18E-05 | 5,41E-03 | 4,16E-02 | 7,05E-04 | 4,33E-05 | 4,33E-05 | 1,15E-03 | 5,89E-03 | 1,64E-06 | 2,23E-04 | 5,89E-03 | 3,03E-02 | 3,03E-02 | 2,23E-04 | 5,89E-03 | 3,03E-02 | 1,15E-03 |
| 0 | 0,5 | 7,29E-03 | 2,45E-02 | 2,45E-02 | 2,45E-02 | 8,04E-03 | 8,04E-03 | 1,23E-03 | 8,04E-03 | 8,04E-03 | 3,14E-03 | 8,04E-03 | 2,06E-02 | 2,06E-02 | 8,04E-03 | 1,23E-03 | 2,06E-02 | 2,06E-02 | 8,04E-03 | 8,04E-03 |
| 0 | 0,5 | 1,31E-10 | 4,84E-02 | 1,28E-06 | 4,84E-02 | 4,84E-02 | 1,28E-06 | 1,02E-10 | 8,78E-08 | 7,60E-05 | 7,60E-05 | 1,02E-10 | 7,60E-05 | 6,57E-02 | 6,57E-02 | 7,60E-05 | 7,60E-05 | 6,57E-02 | 6,57E-02 | 7,60E-05 |

Расположение ячеек относительно оси направления ветра X и их размеры представлены на рис. 4.4.

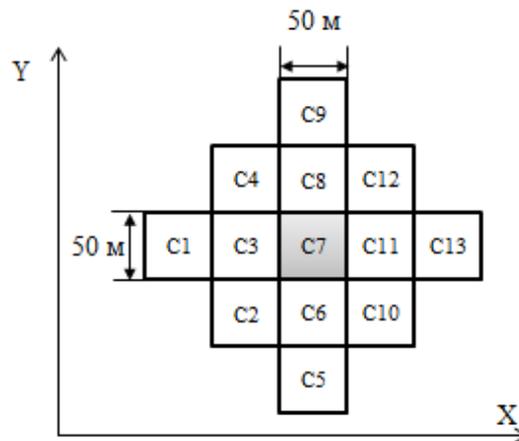


Рис. 4.4. Расположение ячеек относительно оси направления ветра и их размеры

В данной диссертационной работе используется пять ЯНМ, для каждой из которых необходима своя обучающая выборка. Из универсальной выборки по схеме, представленной на рис. 4.5, отбираются необходимые для каждой из моделей данные и составляются обучающие и тестовые выборки.

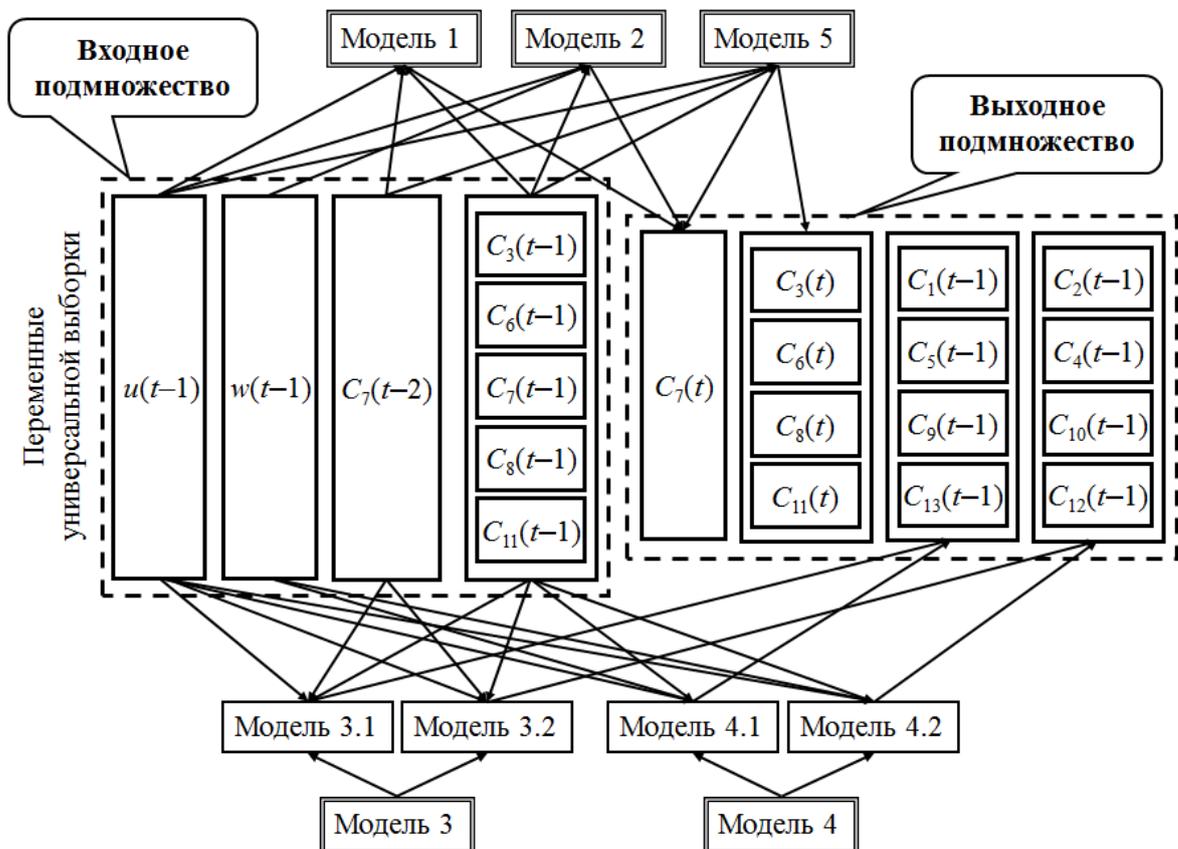


Рис 4.5. Схема использования переменных универсальной выборки в ячейечно-нейросетевых моделях

Из схемы (рис 4.5) видно, что в модели 1 в качестве входных переменных используется скорость ветра, значение концентрации в центральной ячейке в два предшествующих дискретных момента времени назад и значения концентрации в ячейках окрестности фон Неймана в предшествующий момент времени. На выходе – единственное значение концентрации в прогнозируемый момент времени. Для моделей 3 и 5 при том же составе входных переменных в качестве выходных получаются значения концентрации в расширяющих (модель 3.1), угловых (модель 3.2) или ячейках окрестности фон Неймана (модель 5) в текущий момент времени.

В моделях 2 и 4 в качестве входных переменных используются скорость и направление ветра и значения концентрации в ячейках окрестности фон Неймана в предшествующий момент времени. Выходные значения соответствуют моделям 1 и 3 соответственно.

Результаты расчетов по отдельным моделям

В данном разделе рассматривается применение ЯНМ на одном из тестовых примеров (таблица 4.2). Полученные результаты моделирования сравниваются с исходными данными ТОКСИ+Risk.

Таблица 4.2

Тестовый пример

| время | w, град. | u, м/с | C1 (t) | C2 (t) | C3 (t) | C4 (t) | C5 (t) | C6 (t) | C7 (t) | C8 (t) | C9 (t) | C10 (t) | C11 (t) | C12 (t) | C13 (t) |
|-------|----------|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| t-2 | 0 | 1 | 3,75E-04 | 1,63E-03 | 9,06E-04 | 3,75E-04 | 3,95E-03 | 2,94E-03 | 1,63E-03 | 6,75E-04 | 2,08E-04 | 3,95E-03 | 2,19E-03 | 9,06E-04 | 2,19E-03 |
| t-1 | 0 | 1 | 4,88E-05 | 2,80E-04 | 1,70E-04 | 8,04E-05 | 9,77E-04 | 7,61E-04 | 4,62E-04 | 2,18E-04 | 8,04E-05 | 1,61E-03 | 9,77E-04 | 4,62E-04 | 1,61E-03 |
| t | 0 | 1 | 4,42E-06 | 3,05E-05 | 1,99E-05 | 1,04E-05 | 1,37E-04 | 1,10E-04 | 7,19E-05 | 3,78E-05 | 1,60E-05 | 3,23E-04 | 2,10E-04 | 1,10E-04 | 4,96E-04 |
| t+1 | 0 | 1 | 3,50E-07 | 2,71E-06 | 1,87E-06 | 1,07E-06 | 1,45E-05 | 1,20E-05 | 8,27E-06 | 4,73E-06 | 2,25E-06 | 4,41E-05 | 3,04E-05 | 1,74E-05 | 9,29E-05 |
| t+2 | 0 | 1 | 3,29E-08 | 2,72E-07 | 1,96E-07 | 1,21E-07 | 1,62E-06 | 1,38E-06 | 9,96E-07 | 6,12E-07 | 3,19E-07 | 5,94E-06 | 4,30E-06 | 2,64E-06 | 1,58E-05 |
| t+3 | 0 | 1 | 3,18E-09 | 2,72E-08 | 2,04E-08 | 1,33E-08 | 1,74E-07 | 1,51E-07 | 1,14E-07 | 7,39E-08 | 4,17E-08 | 7,29E-07 | 5,48E-07 | 3,57E-07 | 2,29E-06 |
| t+4 | 0 | 1 | 3,26E-10 | 2,82E-09 | 2,19E-09 | 1,50E-09 | 1,90E-08 | 1,67E-08 | 1,29E-08 | 8,85E-09 | 5,33E-09 | 8,69E-08 | 6,74E-08 | 4,61E-08 | 3,09E-07 |
| t+5 | 0 | 1 | 3,61E-11 | 3,11E-10 | 2,48E-10 | 1,77E-10 | 2,14E-09 | 1,91E-09 | 1,52E-09 | 1,08E-09 | 6,88E-10 | 1,05E-08 | 8,34E-09 | 5,94E-09 | 4,08E-08 |
| t+6 | 0 | 1 | 4,32E-12 | 3,67E-11 | 2,99E-11 | 2,21E-11 | 2,55E-10 | 2,30E-10 | 1,88E-10 | 1,38E-10 | 9,19E-11 | 1,30E-09 | 1,06E-09 | 7,81E-10 | 5,42E-09 |

Перед моделированием был проведен анализ структур нейросетевых моделей для выявления оптимального количества скрытых слоев и нейронов в них. Исходя из опыта предыдущих работ [52, 53] при подборе структур ИНС для каждой из моделей были выбраны сети с одним скрытым слоем. Для поиска оптимального количества скрытых нейронов проведены серии обучающих процедур с различным количеством скрытых нейронов. В качестве наилучшей принималась наиболее простая из структур (с наименьшим числом скрытых нейронов), обеспечивающих достаточно малое (с учетом требуемой точности решения) среднее абсолютное отклонение значений, полученных при помощи специализированного ПО ТОКСИ+Risk, от значений, рассчитанных с помощью разработанной ИС «ЯНСКА». Результаты экспериментов для модели 2 представлены в таблице 4.3 и на рис. 4.6.

Результаты поиска оптимального количества нейронов в скрытых слоях

| Сеть | Количество весовых коэффициентов | Средняя абсолютная ошибка |
|---------------|----------------------------------|---------------------------|
| 8-9-1 | 91 | 0,169975 |
| 8-10-1 | 101 | 0,164608 |
| 8-11-1 | 121 | 0,121233 |
| 8-12-1 | 131 | 0,11265 |
| 8-13-1 | 141 | 0,12062 |
| 8-14-1 | 151 | 0,118035 |
| 8-15-1 | 161 | 0,117004 |

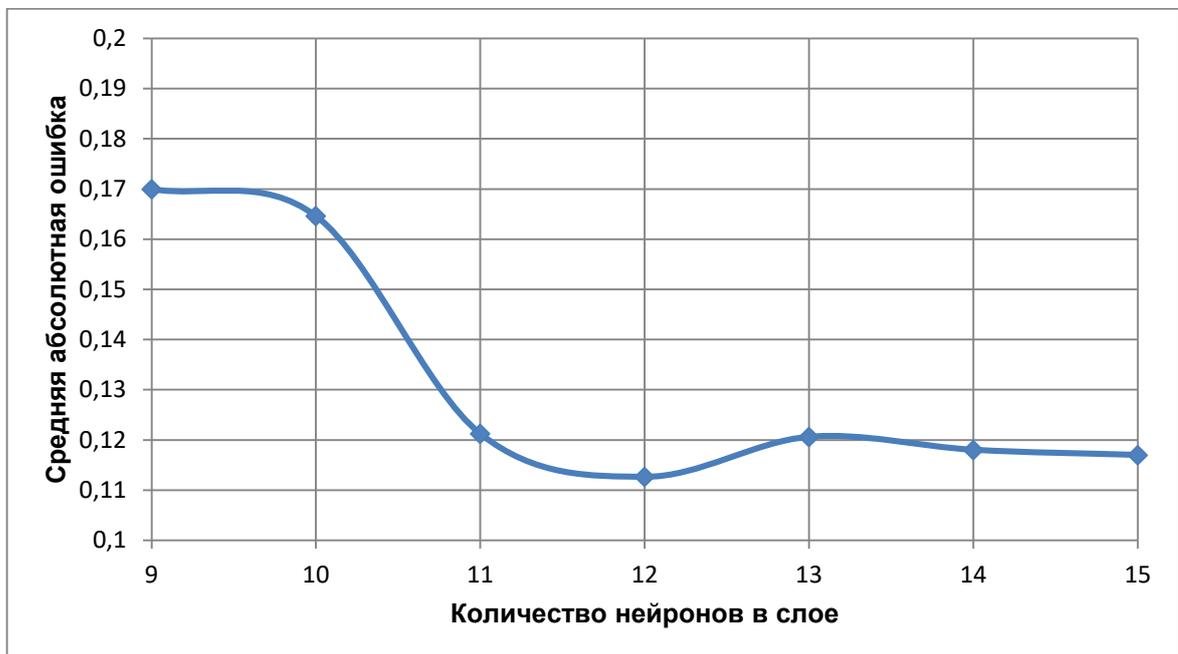


Рис. 4.6. График зависимости средней абсолютной ошибки от количества нейронов в слое

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что наилучшие результаты дает ИНС 8-12-1 (8 входов, 12 нейронов в скрытом слое и 1 выходной нейрон).

Аналогичные эксперименты для поиска оптимального количества нейронов в скрытом слое были проведены для каждой модели.

Также было проведен анализ влияния количества эпох обучение на качество результатов обученной сети. Результаты исследования представлены в таблице 4.4 и на рис. 4.7 (все представленные в таблице и на рисунке эксперименты проведены для оптимальных настроек модели 2).

**Результаты исследования количества эпох на качество
обучения нейронной сети**

| Количество эпох | Средняя абсолютная ошибка |
|-----------------|---------------------------|
| 1000 | 0,571973 |
| 10000 | 0,18342 |
| 50000 | 0,167073 |
| 100000 | 0,11265 |
| 500000 | 0,086459 |

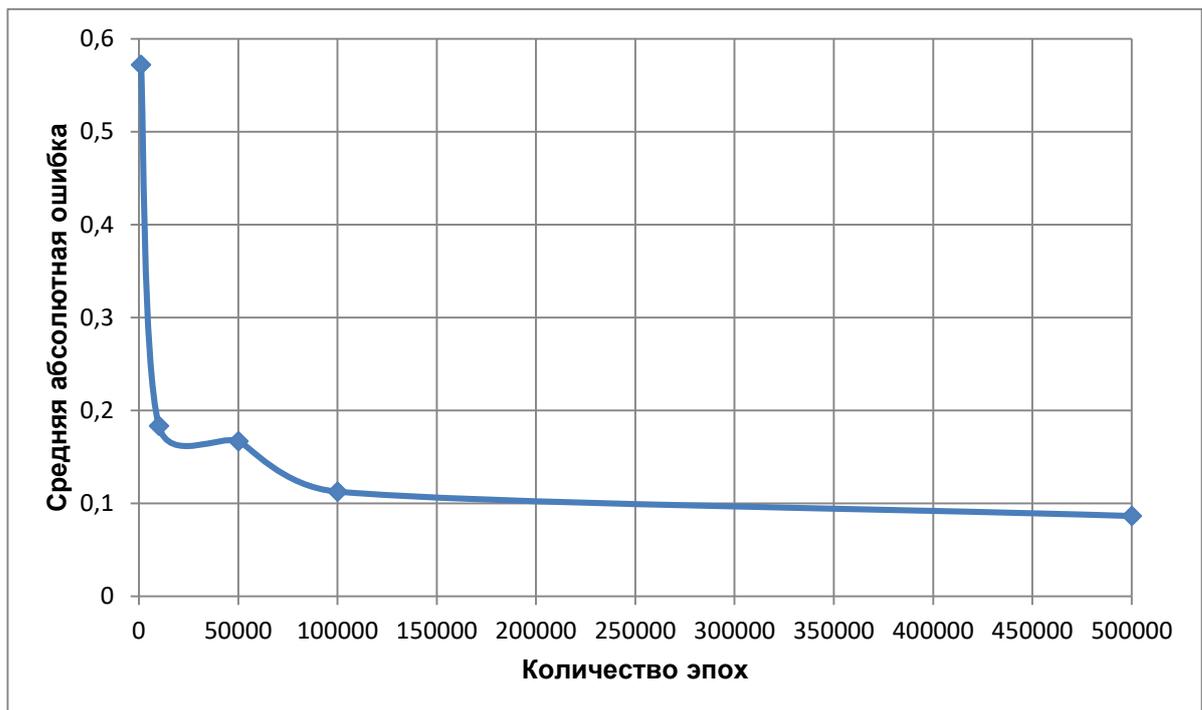


Рис. 4.7. График зависимости средней арифметической ошибки от количества эпох обучения

Из графика видно, что удовлетворительные результаты получаются при 100000 эпохах обучения. При дальнейшем увеличении количества эпох средняя абсолютная ошибка практически не улучшается, а время обучения ИНС значительно увеличивается. Исходя из этого, принято решение обучать ИНС для всех моделей при 100000 эпохах.

После подбора структур ИНС, а также определения оптимального количества эпох обучения, для моделей первой, второй и пятой групп были получены профили концентрации во времени при различных способах зацикливания (копирование или пропорциональное изменение) при постоянных и переменных метеоусловиях. Для

моделей третьей и четвертой групп были получены значения концентраций в угловых (модели 3.1 и 4.1) и расширяющихся (модели 3.2 и 4.2) ячейках в текущий момент времени по известным концентрациям окрестности.

Модель 1

Так как модель 1 учитывает динамику, но не учитывает направление ветра, были получены результаты только для постоянных метеоусловий, которые представлены в таблице 4.5 и на рис. 4.8.

Таблица 4.5

Профили концентрации во времени (модель 1)

| Время, мин | Концентрация кг/м ³ | | |
|------------|--------------------------------|-------------|----------------------------|
| | ТОКСИ | Копирование | Пропорциональное изменение |
| 25 | 1,63E-03 | 1,63E-03 | 1,63E-03 |
| 26,67 | 4,62E-04 | 4,62E-04 | 4,62E-04 |
| 28,33 | 7,19E-05 | 7,17E-05 | 7,17E-05 |
| 30 | 8,27E-06 | 1,57E-05 | 5,89E-06 |
| 31,67 | 9,96E-07 | 4,44E-06 | 2,34E-07 |
| 33,33 | 1,14E-07 | 1,46E-06 | 5,46E-09 |

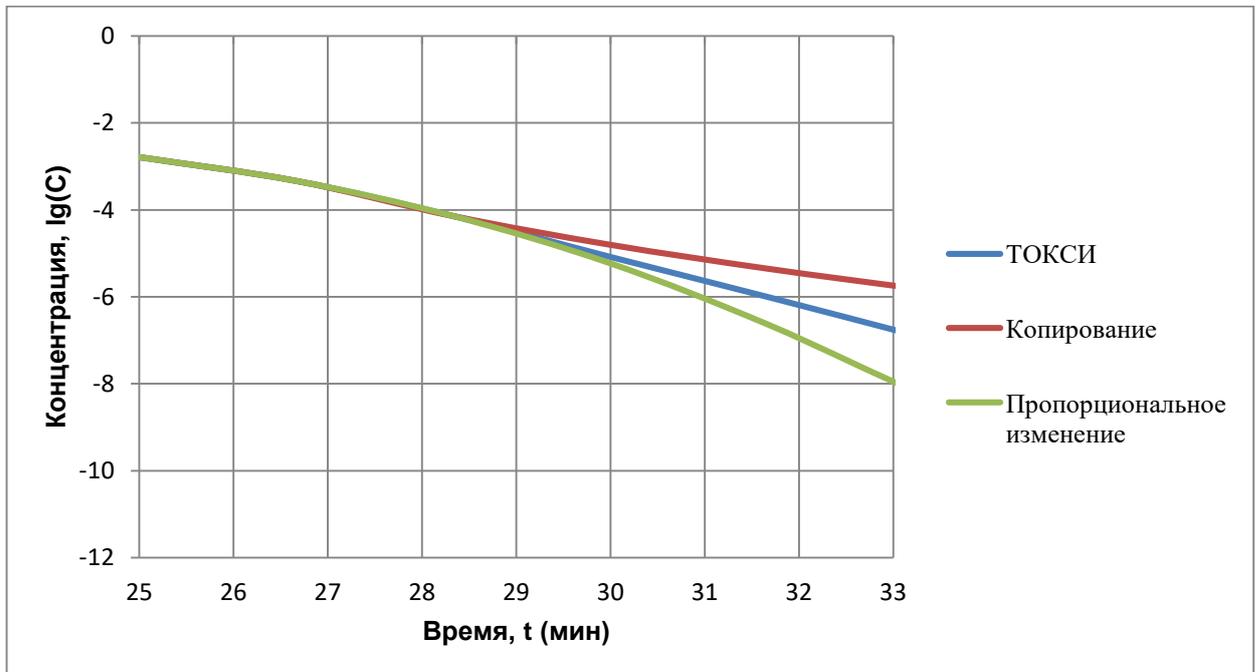


Рис. 4.8. Профили концентрации во времени (модель 1)

Из графика видно, что зацикливание выходных переменных способом копирования в ячейки окрестности фон Неймана дает положительное накопление ошибки прогнозирования с увеличением времени, а зацикливание выходных переменных способом пропорционального изменения – отрицательное накопление ошибки в сравнении с расчетной методикой ТОКСИ 3. Приведенная динамика показывает, что наиболее эффективно модель работает при прогнозировании на 1 или 2 момента времени вперед.

Модель 2

С использованием модели 2 были получены профили концентрации для постоянных метеоусловий, а также для переменных метеоусловий на 7 моментов времени вперед. Результаты моделирования представлены в таблицах 4.6 и 4.7 и на рисунках 4.9 и 4.10.

Постоянные метеоусловия

Таблица 4.6

Профили концентрации во времени (модель 2)

| Время, мин | Концентрация кг/м ³ | | |
|---------------|--------------------------------|-------------|----------------------------|
| | ТОКСИ | Копирование | Пропорциональное изменение |
| 26,67 | 4,62E-04 | 4,62E-04 | 4,62E-04 |
| 28,33 | 7,19E-05 | 6,25E-05 | 6,25E-05 |
| 30,00 | 8,27E-06 | 7,77E-05 | 8,18E-06 |
| 31,67 | 9,96E-07 | 9,13E-05 | 8,61E-07 |
| 33,33 | 1,14E-07 | 1,03E-04 | 6,57E-08 |
| 35,00 | 1,29E-08 | 1,12E-04 | 4,05E-09 |
| 36,67 | 1,52E-09 | 1,18E-04 | 3,66E-10 |
| 38,33 | 1,88E-10 | 1,24E-04 | 1,68E-10 |

Результаты показывают (рис. 4.9), что моделирование без учета динамики распространения ЗВ при зацикливании входных переменных способом копирования в ячейки окрестности фон Неймана дает неудовлетворительные результаты. Это связано с тем, что при копировании все концентрации, подаваемые на вход ИНС, одинаковы и из-за этого возникает проблема с определением направления ветра, так как оно определяется исключительно по входным концентрациям.

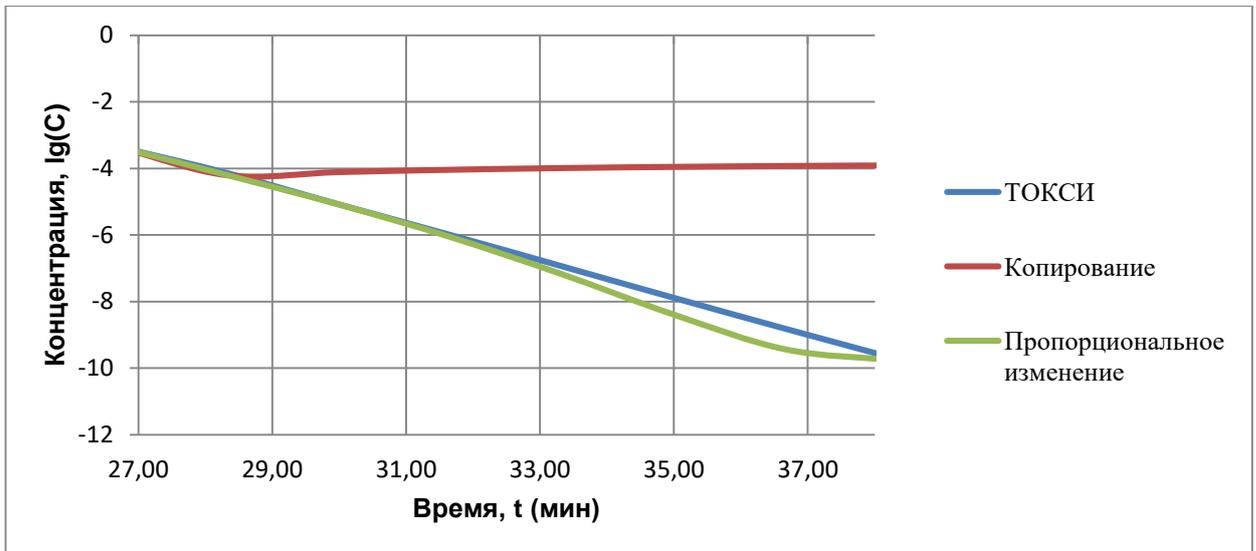


Рис. 4.9. Профили концентрации во времени (модель 2)

При зацикливании входных переменных способом пропорционального изменения полученные результаты практически идентичны с рассчитанными по методике ТОКСИ 3.

Переменные метеоусловия

Так как результаты при постоянных метеоусловиях при зацикливании входных переменных способом копирования были не удовлетворительны, при переменных условиях был выбран второй (пропорциональное изменение) способ получения профилей концентрации во времени (таблица 4.7).

Таблица 4.7

Профили концентрации во времени и сценарий для переменных метеоусловий (модель 2)

| Время, мин | Концентрация, кг/м ³ | | | Сценарий для переменных метеоусловий | |
|------------|---------------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------------------|--------|
| | ТОКСИ | Постоянные метеоусловия | Переменные метеоусловия | w, град. | u, м/с |
| 26,67 | 4,62E-04 | 4,62E-04 | 4,62E-04 | 0 | 1 |
| 28,33 | 7,19E-05 | 6,25E-05 | 6,25E-05 | 0 | 1 |
| 30,00 | 8,27E-06 | 8,18E-06 | 8,18E-06 | 0 | 1 |
| 31,67 | 9,96E-07 | 8,61E-07 | 5,00E-10 | 45 | 2 |
| 33,33 | 1,14E-07 | 6,57E-08 | 1,54E-10 | 45 | 2 |
| 35,00 | 1,29E-08 | 4,05E-09 | 1,54E-10 | 60 | 2,5 |
| 36,67 | 1,52E-09 | 3,66E-10 | 1,54E-10 | 60 | 2,5 |
| 38,33 | 1,88E-10 | 1,68E-10 | 1,54E-10 | 60 | 2,5 |

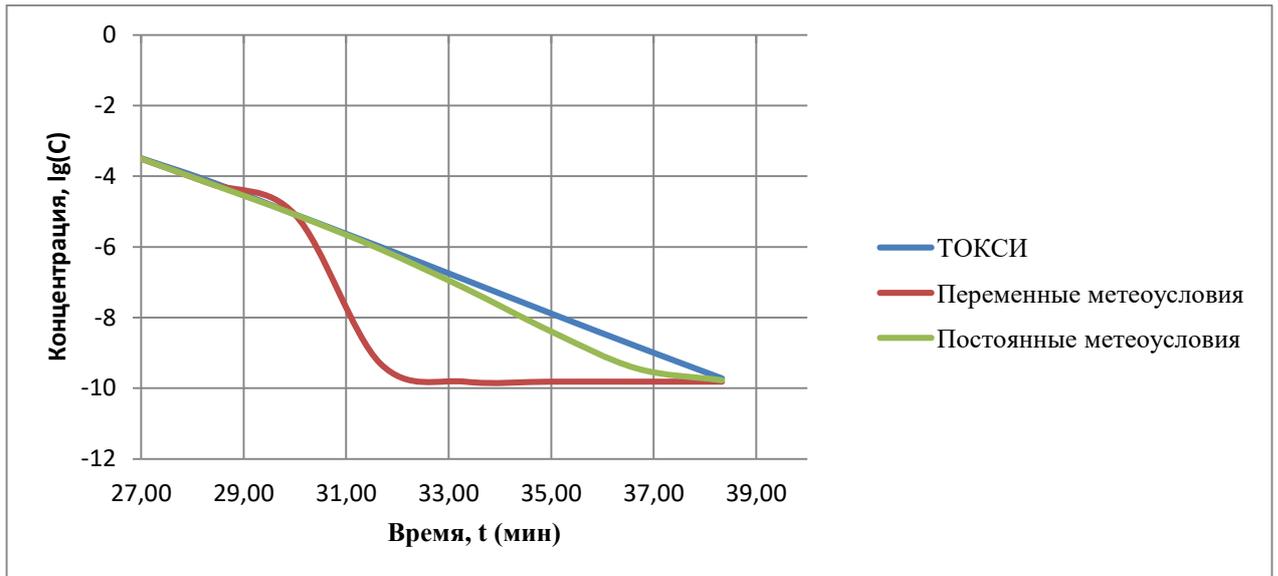


Рис. 4.10. Профили концентрации во времени (модель 2)

На основе представленных результатов (для моделей 1 и 2) можно заключить следующее:

- концентрация ЗВ снижается до минимального уровня при переменных метеоусловиях гораздо быстрее: 32 минуты против 38 минут (рис. 4.10), что объясняется повышением скорости ветра;
- ошибка моделирования по модели 2 при одинаковых постоянных метеоусловиях значительно меньше, чем по модели 1;
- модель 2 может быть использована для прогнозирования на большее количество дискретных моментов времени.

Модели 3 и 4

По моделям 3 и 4 были получены результаты экстраполяции поля концентрации в текущий момент времени по известным значениям концентраций окрестности с учетом (модель 3) и без учета (модель 4) динамики распространения примеси (таблица 4.8 и рис. 4.11 – 4.12).

Как видно из таблицы 4.8, расчет по модели 3 немного точнее, так как учитывается динамика распространения примеси, но нет возможности экстраполировать при переменных метеоусловиях. В связи с этим в обобщающей модели при постоянных метеоусловиях используется модель 3, а при переменных модель 4.

**Концентрация в смежных с окрестностью фон Неймана ячейках при
экстраполяции поля концентрации**

| Ячейка | Концентрация кг/м ³ | | |
|--|--------------------------------|----------|----------|
| | ТОКСИ | Модель 3 | Модель 4 |
| C1 | 4,42E-06 | 4,57E-05 | 4,79E-05 |
| C2 | 3,05E-05 | 2,74E-04 | 2,74E-04 |
| C4 | 1,04E-05 | 7,96E-05 | 8,00E-05 |
| C5 | 1,37E-04 | 1,02E-03 | 1,04E-03 |
| C9 | 1,60E-05 | 7,80E-05 | 7,92E-05 |
| C10 | 3,23E-04 | 1,66E-03 | 1,64E-03 |
| C12 | 1,10E-04 | 4,60E-04 | 4,46E-04 |
| C13 | 4,96E-04 | 1,55E-03 | 1,62E-03 |
| Средняя абсолютная ошибка, кг/м ³ | | 0,000506 | 0,000512 |

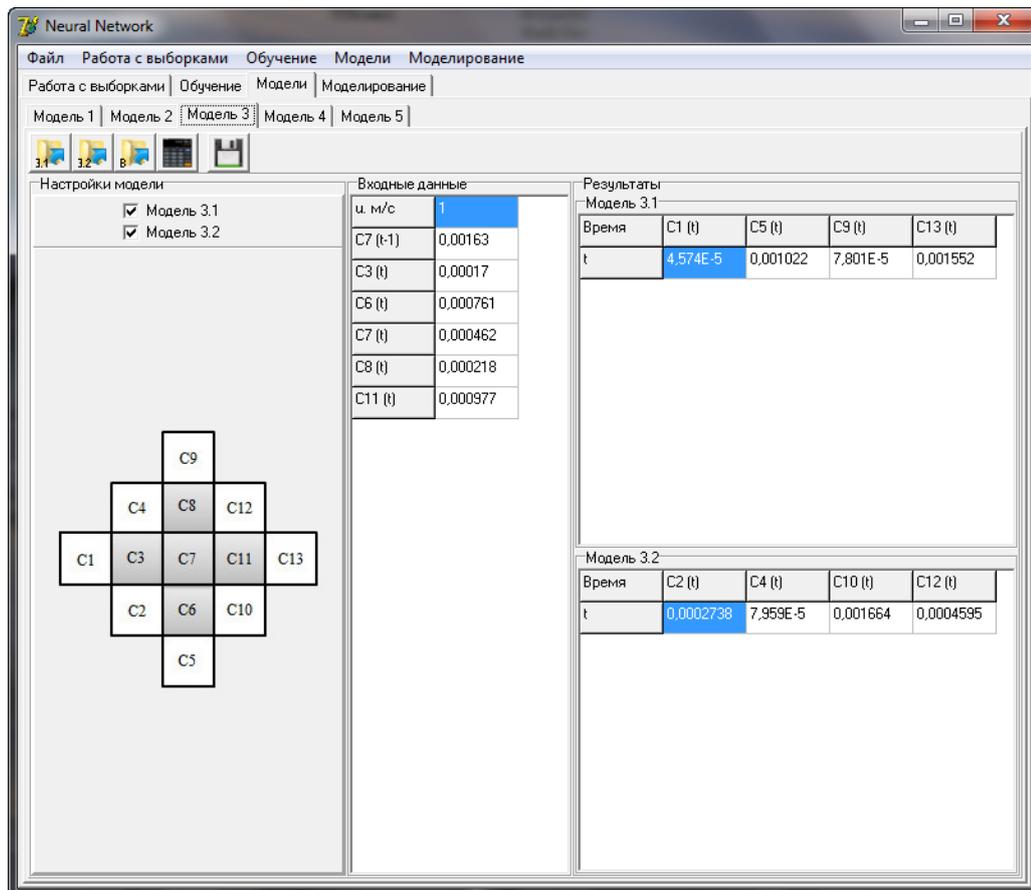


Рис. 4.11. Результаты экстраполяции поля концентрации в смежных ячейках с учетом динамики распространения примеси

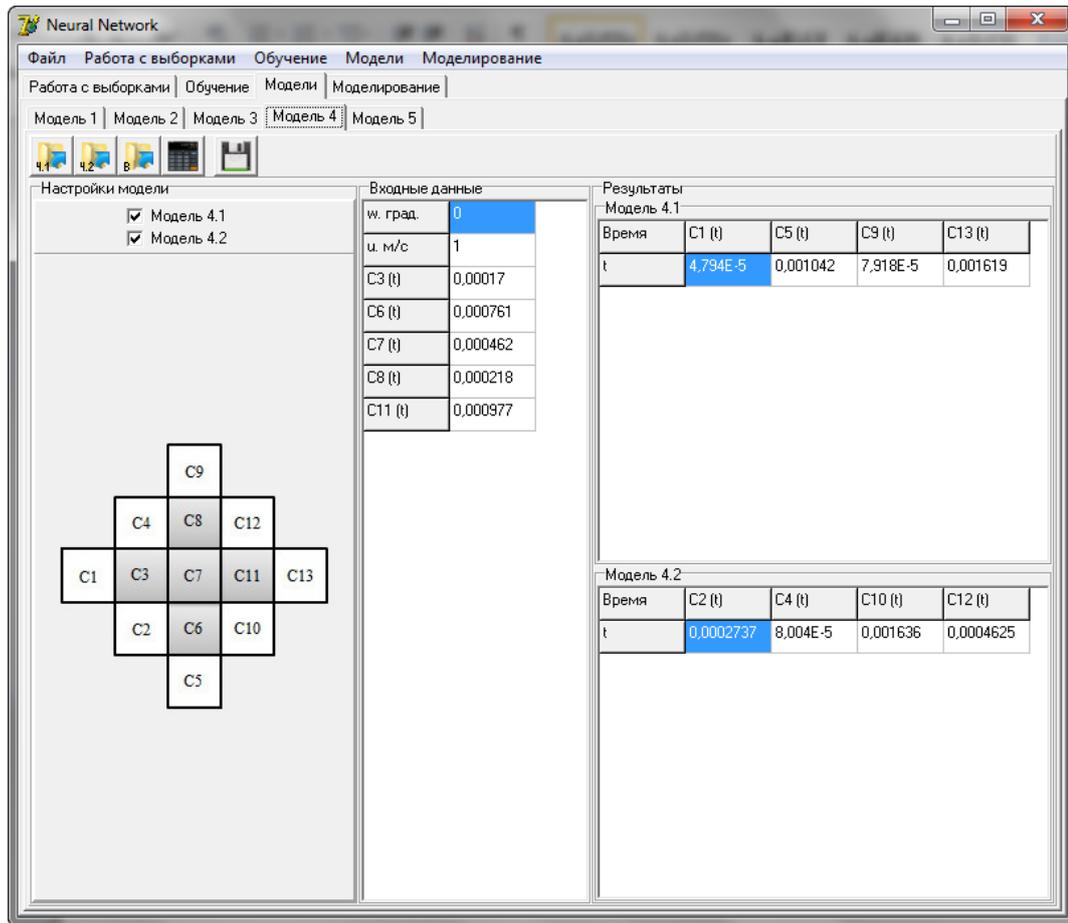


Рис. 4.12. Результаты экстраполяции поля концентрации в смежных ячейках без учета динамики распространения примеси

Модель 5

На рис. 4.13 представлены значения концентраций, получившиеся с помощью модели 5 на один дискретный момент времени вперед для 5 ячеек окрестности фон Неймана.

В таблице 4.9 представлены результаты моделирования по модели 5 в сравнении с полученными с помощью специализированного ПО ТОКСИ+Risk.

Таблица 4.9

Концентрация в ячейках окрестности фон Неймана

| Ячейка | Концентрация, кг/м ³ | |
|--------|---------------------------------|----------|
| | ТОКСИ | Модель 5 |
| C3 | 1,99E-05 | 1,35E-05 |
| C6 | 1,10E-04 | 1,02E-04 |
| C7 | 7,19E-05 | 4,91E-05 |
| C8 | 3,78E-05 | 1,85E-05 |
| C11 | 2,10E-04 | 1,29E-04 |

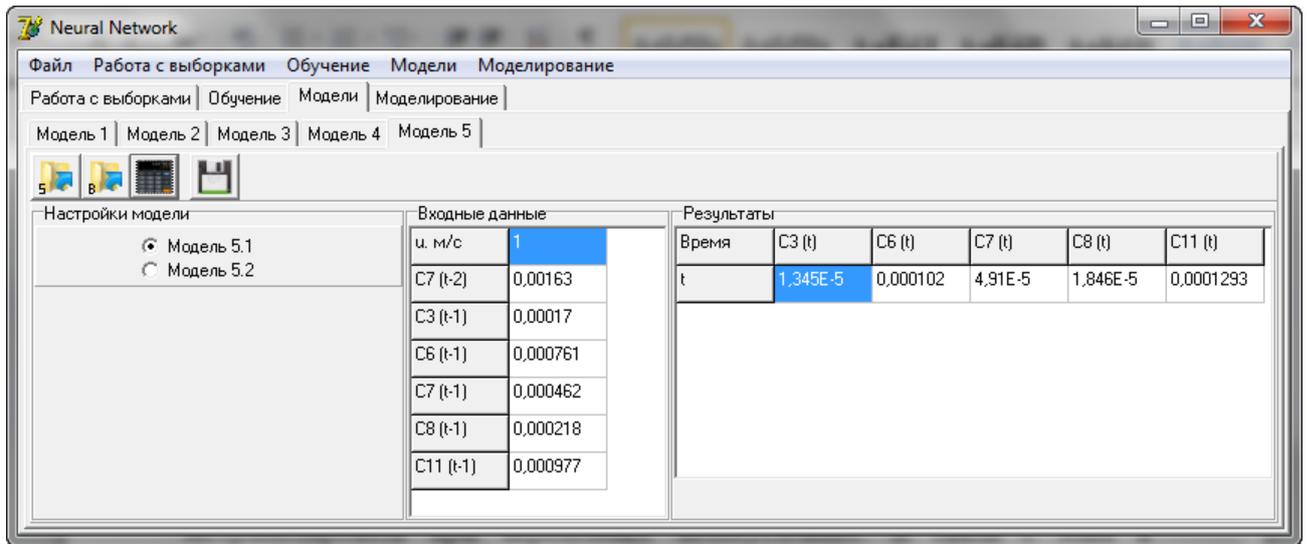


Рис. 4.13. Результаты моделирования по модели 5 на один дискретный момент времени вперед

Так как на выходе ИНС пять концентраций для каждой из ячеек окрестности, то моделирование на несколько моментов времени вперед дает большое накопление ошибки. Для более качественного анализа данной модели и получения лучших результатов необходима обучающая выборка, содержащая большее количество примеров.

Результаты моделирования по обобщающей модели

Все разработанные модели используются в обобщающей модели для формирования полей концентрации в различные моменты времени. На рис. 4.14 представлены результаты моделирования полей для постоянных и переменных метеоусловий.

Из рис. 4.14 видно, что при повышении скорости ветра и изменении его направления местоположение мгновенной ЗЗ отличается от ее локализации, полученной при стационарных метеоусловиях. Расстояние между центрами мгновенных ЗЗ в момент времени 300 с в этих двух случаях составляет 550 м (время и координаты отсчитываются от точки начала прогнозирования).

Разработанная ИС «ЯНСКА» позволяет также рассчитать значение доз токсического поражения для любой точки местности, для которой происходит моделирование и строить профили концентрации по времени, ширине и длине зоны моделирования. На рис. 4.15 представлен пример зависимости токсодоз от времени экспозиции в одной и той же точке при постоянных и переменных метеоусловиях.

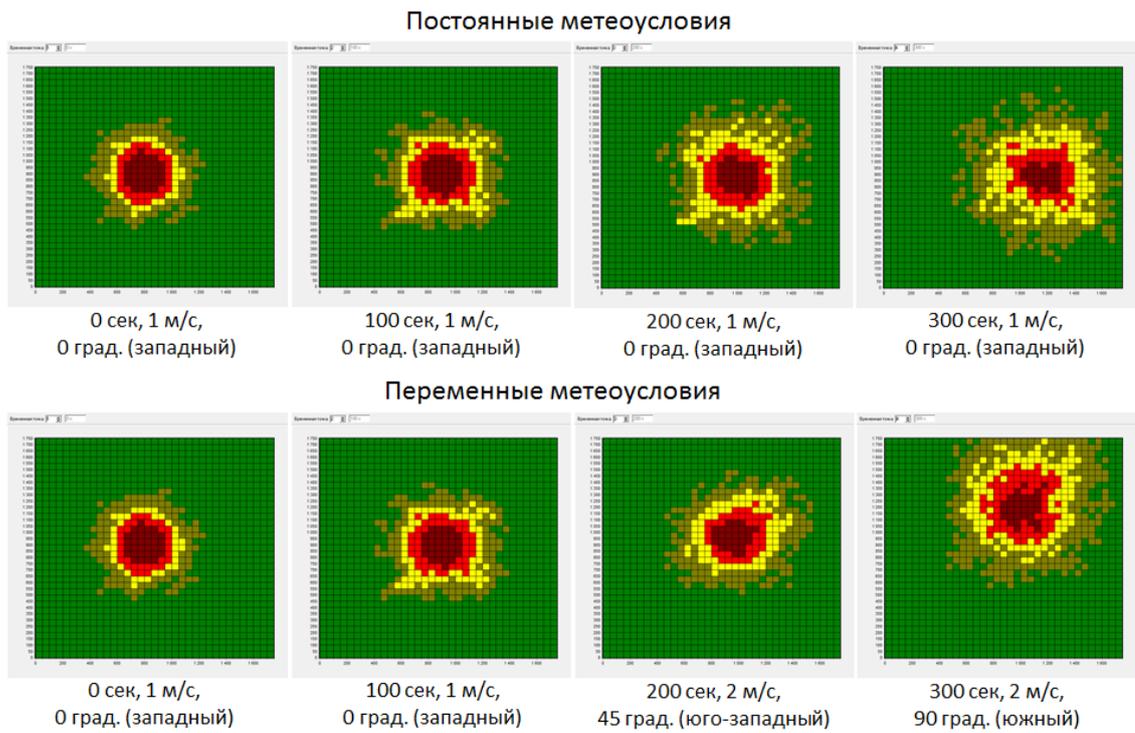


Рис. 4.14. Поля концентрации в различные моменты времени для постоянных и переменных метеоусловий

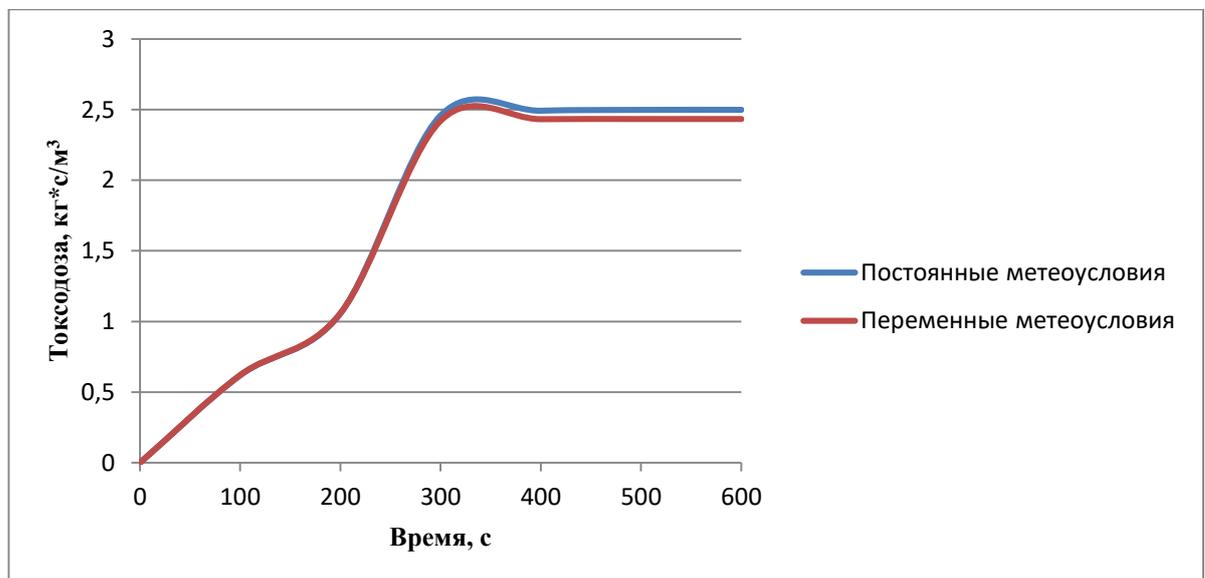


Рис. 4.15. Зависимости токсодоз от времени экспозиции при постоянных и переменных метеоусловиях

Значения токсодоз достигают своих максимумов через 300 секунд, начиная с момента подхода облака ЗВ, и составляют $2,5 \text{ кг}\cdot\text{с}/\text{м}^3$.

На рис. 4.16 – 4.18 представлены профили концентрации по длине, ширине зоны и времени соответственно.

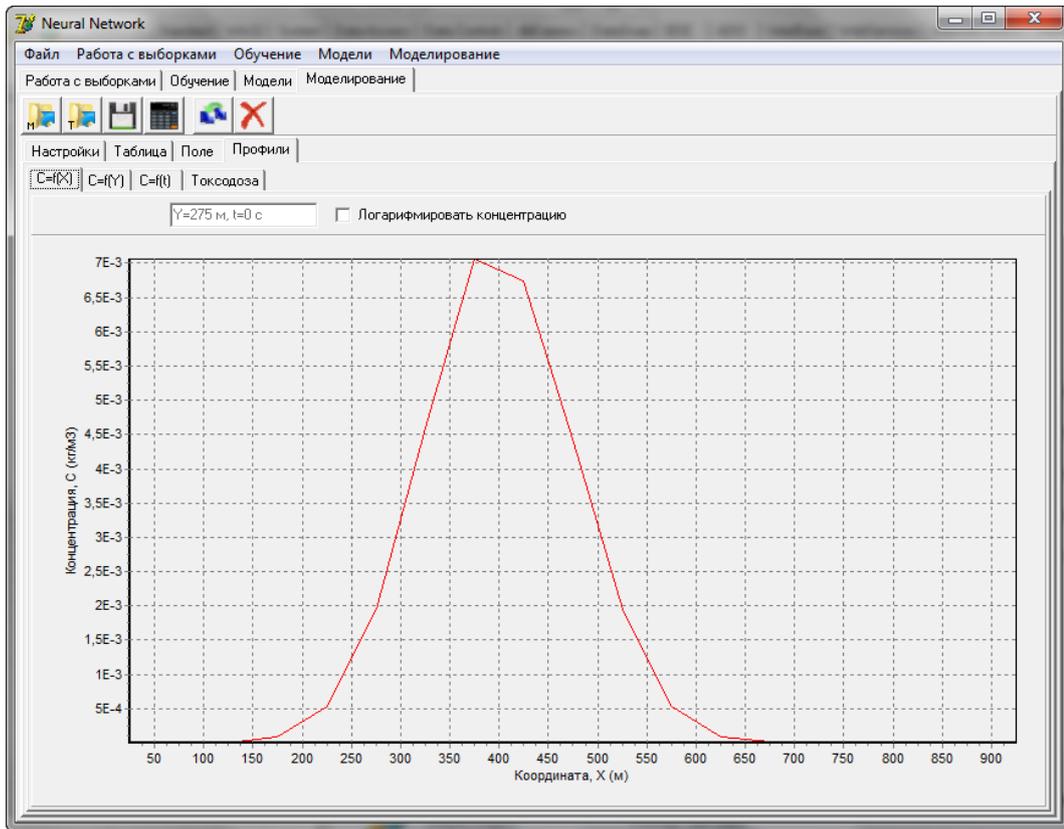


Рис. 4.16. Профиль концентрации по длине зоны моделирования

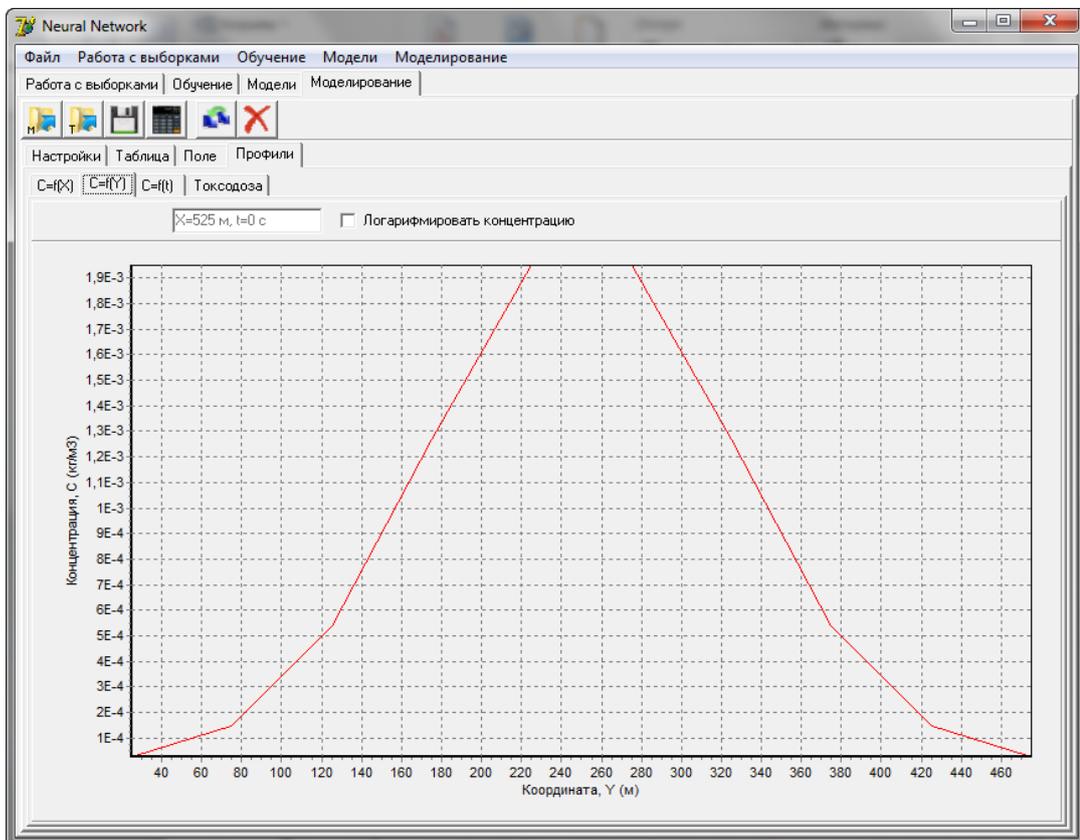


Рис. 4.17. Профиль концентрации по ширине зоны моделирования

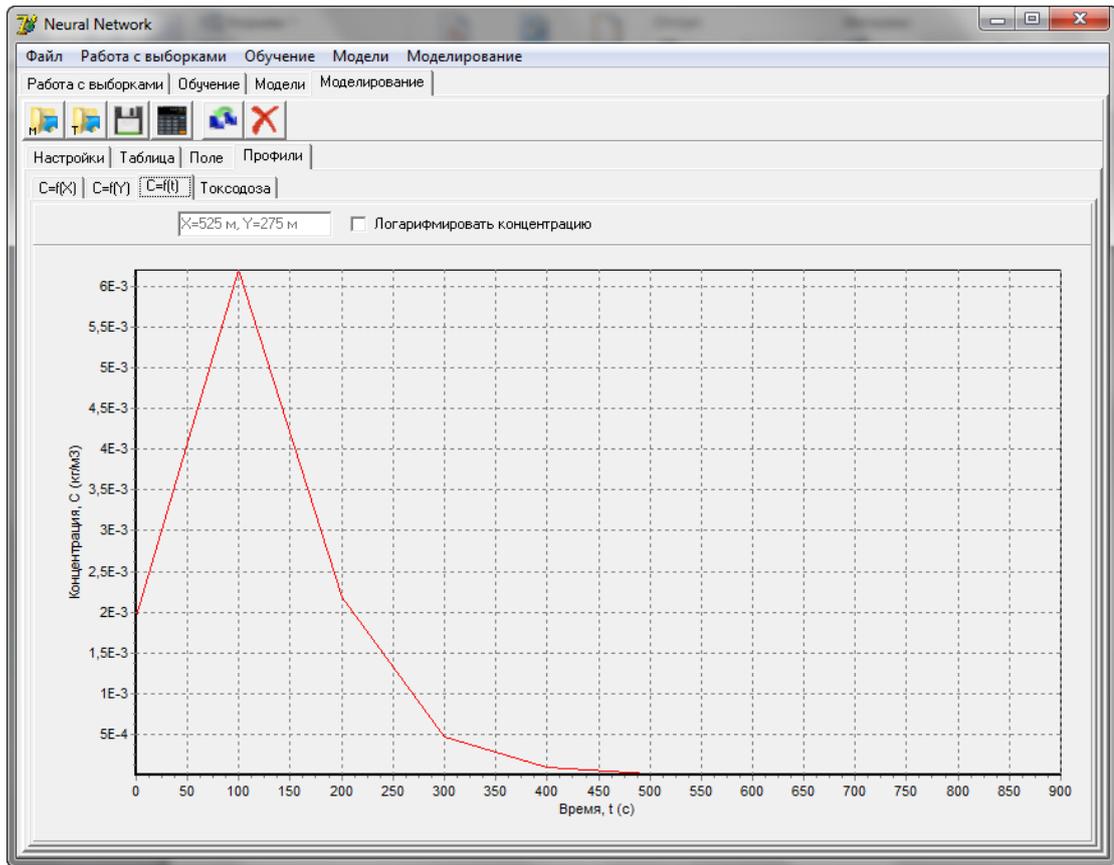


Рис. 4.18. Профиль концентрации по времени для одной из ячеек зоны моделирования

Из первого графика (рис. 4.16) видно, что максимальная концентрация наблюдается на расстоянии 375 м по длине зоны моделирования, которая составляет 900 м.

По результатам, представленным на втором графике (рис. 4.17), можно сказать, что максимальная концентрация наблюдается на отрезке 225 – 275 м по ширине зоны моделирования, которая составляет 400 м.

Из графика, представленного на рис. 4.18, видно, что максимальная концентрация для точки с координатами 525 м по длине и 275 м по ширине зоны моделирования наблюдается через 100 с с момента подхода облака ЗВ.

Таким образом, данные графики (рис. 4.16 – 4.18) демонстрируют, как изменятся концентрация в пространстве и времени. Также по ним легко определить наиболее опасные участки поля, где наблюдается максимальная концентрация ЗВ.

4.2. Верификация методического и программно-алгоритмического обеспечения системы на примерах произошедших промышленных аварий

Для оценки возможности практического использования ЯНМ для решения

задач ОВОС химических аварий воспользуемся исходными данными по реально имевшему место выбросу аммиака, произошедшему 13.07.1973 в Потчеструме (ЮАР). Исходные данные взяты из [67]: масса выброса 38 т; условия хранения – в сжиженном состоянии при температуре 15° С, без обвалования; тип местности – центры небольших городов; метеоусловия – скорость ветра 1 м/с, класс устойчивости атмосферы F.

Для формирования обучающей выборки проведен вычислительный эксперимент с использованием программного комплекса ТОКСИ+. Объем выборки составил 786 примеров, полученных для различных точек местности, подвергшейся загрязнению, в различные моменты времени после аварии. Была выбрана ЯНМ с квадратными ячейками, включающая 6 входных переменных, соответствующих концентрациям аммиака в 5 ячейках окрестности в предшествующий момент времени и дополнительным значением концентрации в центральной ячейке на два предшествующих дискретных момента времени назад. Выходными переменными являются 5 значений концентрации аммиака в прогнозируемый момент времени в ячейках той же окрестности.

Интервал между дискретными моментами времени составлял 100 с.

Результаты вычислительного эксперимента, использованные для формирования обучающей выборки, – концентрации аммиака в воздухе – получены по программе ТОКСИ+ в кг/м³. Учитывая специфику этих переменных и опыт предыдущих работ [52], все переменные были прологарифмированы с целью соблюдения требования о равномерном распределении примеров обучающей выборки в ОДЗ каждой переменной:

$$\tilde{x} = \lg(x) \quad (4.1)$$

Полученные логарифмированные концентрации линейно нормировались с помощью разработанной программы. Полученные на выходе нормированные концентрации также автоматически денормировались и приводились к значениям концентрации в исходных единицах измерения:

$$y = 10^{\tilde{y}} \quad (4.2)$$

Проведена серия вычислительных экспериментов по получению концентрационных профилей для их сравнения с результатами прямых расчетов по программе ТОКСИ+ на расстояниях 900 и 1200 м по оси ветра от места выброса, так как, в соответствии с выводами авторов [67], именно на этих расстояниях находится передняя граница зоны порогового поражения при 30- и 60-минутной экспозиции для выбранных условий аварии.

Вычислительные эксперименты различались:

- выбором координаты на оси ветра для построения концентрационного профиля: 900 м и 1200 м;
- количеством скрытых слоев ИНС: один или два;
- количеством нейронов в скрытых слоях;
- значением параметра активационной функции (сигмоида): 0,5, 1, 2;
- составом примеров обучающей выборки: все примеры, только примеры для ячеек, расположенных на оси ветра;
- способом закливания выходных переменных: независимая подача (выходные значения каждой ячейки соответствуют входным значениям своих же ячеек), копирование выходного значения центральной ячейки на все входы, соответствующие данному моменту времени.

Использование копирования выходного значения центральной ячейки обусловлено накоплением различных по величине ошибок в ячейках при их многократной независимой подаче и связанным с этим искажением результатов расчета в центральной ячейке. Возможность копирования выходной концентрации в центральной ячейке на входы, соответствующие всем пяти ячейкам данного момента времени, обусловлена незначительной разницей в концентрации ЗВ во всех ячейках окрестности при времени после аварии от 1000 с, что было выявлено в результате расчетов по программе ТОКСИ+.

Характеристика вычислительных экспериментов представлена в таблице 4.10. Результаты вычислительных экспериментов (профили изменения концентрации во времени для точек 900 м и 1200 м от места аварии по оси ветра) представлены в таблицах 4.11 и 4.12. Подбор наилучших настроек производился, главным образом, для точки 900 м. Выбранные настройки затем были использованы для точки 1200 м.

Таблица 4.10.

Характеристика вычислительных экспериментов

| Признак | Номер вычислительного эксперимента | | | | | | | | | | | |
|---|------------------------------------|----------|--------|--------|--------|--------|----------|----------|----------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| Расстояние по оси ветра | 900 м | 1200 м | 900 м | 900 м | 900 м | 900 м | 900 м | 900 м | 900 м | 900 м | 1200 м | 900 м |
| Количество скрытых слоев | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 |
| Количество нейронов | 22 | 22 | 22 | 15 | 6 и 5 | 9 | 15 | 15 | 6 и 5 | 6 и 5 | 22 | 22 |
| Параметр активационной функции | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 2,0 | 0,5 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| Состав примеров выборки | Все | Все | Осевые | Осевые | Осевые | Осевые | Все | Все | Все | Все | Все | Все |
| Способ зацикливания переменных | Независ. | Независ. | Копир. | Копир. | Копир. | Копир. | Независ. | Независ. | Независ. | Копир. | Копир. | Копир. |
| Оценка результатов вычислительного эксперимента | | | | | | | | | | | | |
| Среднеквадратичное отклонение | 0,0250 | 0,0122 | 0,0274 | 0,0254 | 0,0326 | 0,0276 | 0,0244 | 0,0312 | 0,0443 | 0,0232 | 0,0044 | 0,0169 |
| Максимальное абсолютное отклонение | 0,165 | 0,142 | 0,141 | 0,160 | 0,187 | 0,171 | 0,155 | 0,184 | 0,250 | 0,117 | 0,041 | 0,110 |

Таблица 4.11.

**Результаты вычислительных экспериментов для точки 900 м от места аварии по оси ветра –
концентрация аммиака, % об.**

| Время после аварии, с | Номер вычислительного эксперимента | | | | | | | | | | Расчет по ТОКСИ+ |
|--------------------------------|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------------------------|
| | 1 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 12 | |
| 800 | 0,567 | 0,483 | 0,575 | 0,531 | 0,566 | 0,577 | 0,532 | 0,538 | 0,498 | 0,569 | 0,583 |
| 900 | 0,455 | 0,361 | 0,451 | 0,394 | 0,440 | 0,456 | 0,405 | 0,354 | 0,389 | 0,486 | 0,491 |
| 1000 | 0,355 | 0,280 | 0,343 | 0,287 | 0,331 | 0,348 | 0,305 | 0,195 | 0,312 | 0,424 | 0,419 |
| 1100 | 0,264 | 0,222 | 0,249 | 0,201 | 0,237 | 0,253 | 0,220 | 0,113 | 0,251 | 0,373 | 0,363 |
| 1200 | 0,184 | 0,178 | 0,174 | 0,135 | 0,162 | 0,177 | 0,149 | 0,068 | 0,200 | 0,328 | 0,316 |
| 1300 | 0,120 | 0,145 | 0,118 | 0,089 | 0,107 | 0,123 | 0,094 | 0,041 | 0,160 | 0,287 | 0,277 |
| 1400 | 0,076 | 0,119 | 0,081 | 0,059 | 0,071 | 0,087 | 0,058 | 0,025 | 0,128 | 0,249 | 0,241 |
| 1500 | 0,048 | 0,098 | 0,058 | 0,041 | 0,049 | 0,064 | 0,035 | 0,017 | 0,102 | 0,214 | 0,181 |
| 1600 | 0,031 | 0,080 | 0,044 | 0,030 | 0,035 | 0,049 | 0,023 | 0,012 | 0,082 | 0,181 | 0,084 |
| 1700 | 0,021 | 0,065 | 0,035 | 0,024 | 0,027 | 0,039 | 0,015 | 0,009 | 0,066 | 0,152 | 0,042 |
| 1800 | 0,015 | 0,052 | 0,030 | 0,020 | 0,022 | 0,033 | 0,011 | 0,007 | 0,054 | 0,127 | 0,024 |
| 1900 | 0,012 | 0,041 | 0,026 | 0,017 | 0,019 | 0,030 | 0,009 | 0,006 | 0,044 | 0,105 | 0,014 |
| 2000 | 0,009 | 0,032 | 0,024 | 0,015 | 0,016 | 0,029 | 0,007 | 0,005 | 0,036 | 0,087 | 0,010 |

**Результаты вычислительных экспериментов для точки 1200 м от места
аварии по оси ветра – концентрация аммиака, % об.**

| Время после аварии, с | Номер вычислительного эксперимента | | Расчет по ТОКСИ+ |
|--------------------------|---------------------------------------|-------|---------------------|
| | 2 | 11 | |
| 1000 | 0,431 | 0,428 | 0,419 |
| 1100 | 0,342 | 0,377 | 0,363 |
| 1200 | 0,253 | 0,331 | 0,315 |
| 1300 | 0,175 | 0,290 | 0,277 |
| 1400 | 0,113 | 0,252 | 0,240 |
| 1500 | 0,071 | 0,216 | 0,213 |
| 1600 | 0,052 | 0,184 | 0,189 |
| 1700 | 0,030 | 0,154 | 0,168 |
| 1800 | 0,020 | 0,129 | 0,138 |
| 1900 | 0,015 | 0,107 | 0,079 |
| 2000 | 0,011 | 0,088 | 0,047 |
| 2100 | 0,009 | 0,073 | 0,030 |
| 2200 | 0,008 | 0,061 | 0,020 |
| 2300 | 0,008 | 0,051 | 0,013 |
| 2400 | 0,007 | 0,043 | 0,009 |
| 2500 | 0,007 | 0,037 | 0,007 |
| 2600 | 0,007 | 0,032 | 0,005 |
| 2700 | 0,007 | 0,029 | 0,004 |
| 2800 | 0,007 | 0,026 | 0,004 |
| 2900 | 0,007 | 0,023 | 0,003 |
| 3000 | 0,007 | 0,021 | 0,003 |
| 3100 | 0,007 | 0,019 | 0,002 |
| 3200 | 0,007 | 0,018 | 0,002 |
| 3300 | 0,007 | 0,016 | 0,002 |
| 3400 | 0,006 | 0,015 | 0,002 |
| 3500 | 0,006 | 0,014 | 0,002 |
| 3600 | 0,006 | 0,014 | 0,002 |

Сравнительный анализ полученных зависимостей позволяет выделить следующие наилучшие настройки (соответствуют экспериментам №№ 11, 12):

- ИНС с одним скрытым слоем, включающим 22 нейрона;
- параметр активационной сигмоидной функции 1;
- использование всех примеров обучающей выборки, как с осевым расположением базовой ячейки, так и с расположением, отличающимся от осевого;
- закливание выходных переменных копированием значения базовой ячейки на все входные переменные для одного и того же момента времени.

Проводилось сравнение полученных наилучших для каждой точки концентрационных профилей с результатами прямых расчетов по программе ТОКСИ+. Данные зависимости представлены на рис. 4.19 – 4.20. Показаны фрагменты концентрационных профилей, для которых наблюдаются наибольшие отклонения в расчетах.

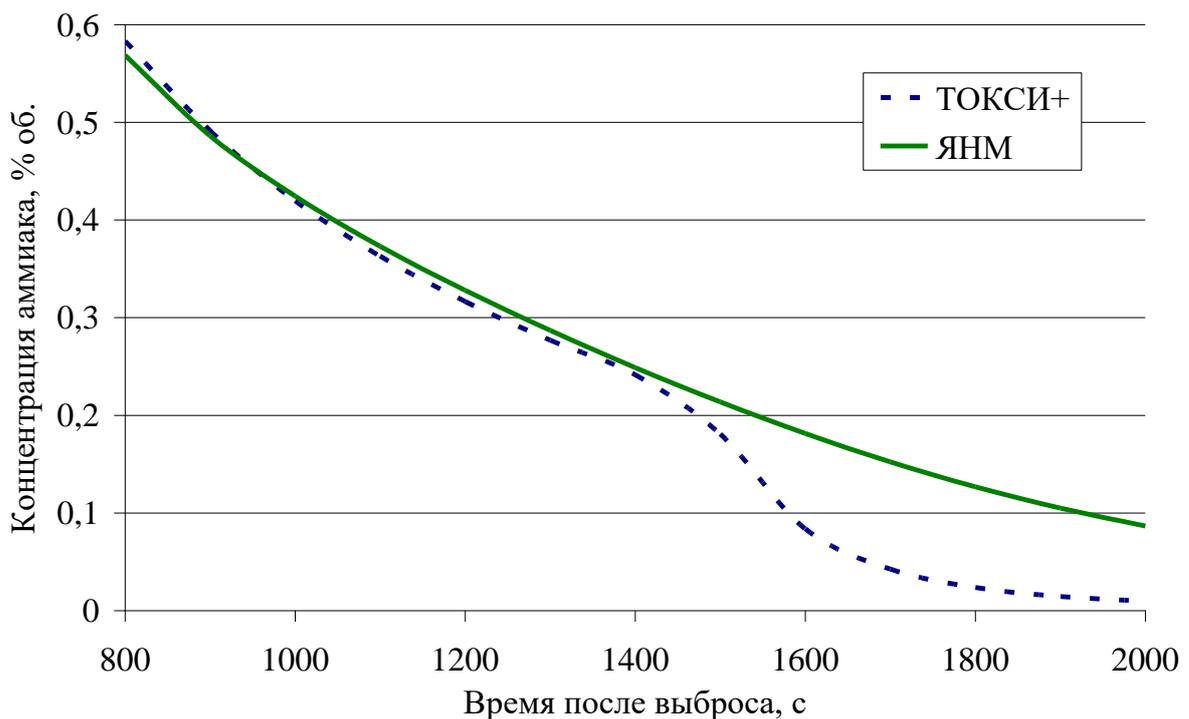


Рис. 4.19. Изменение концентрации аммиака во времени для точки 900 м от места аварии по оси ветра

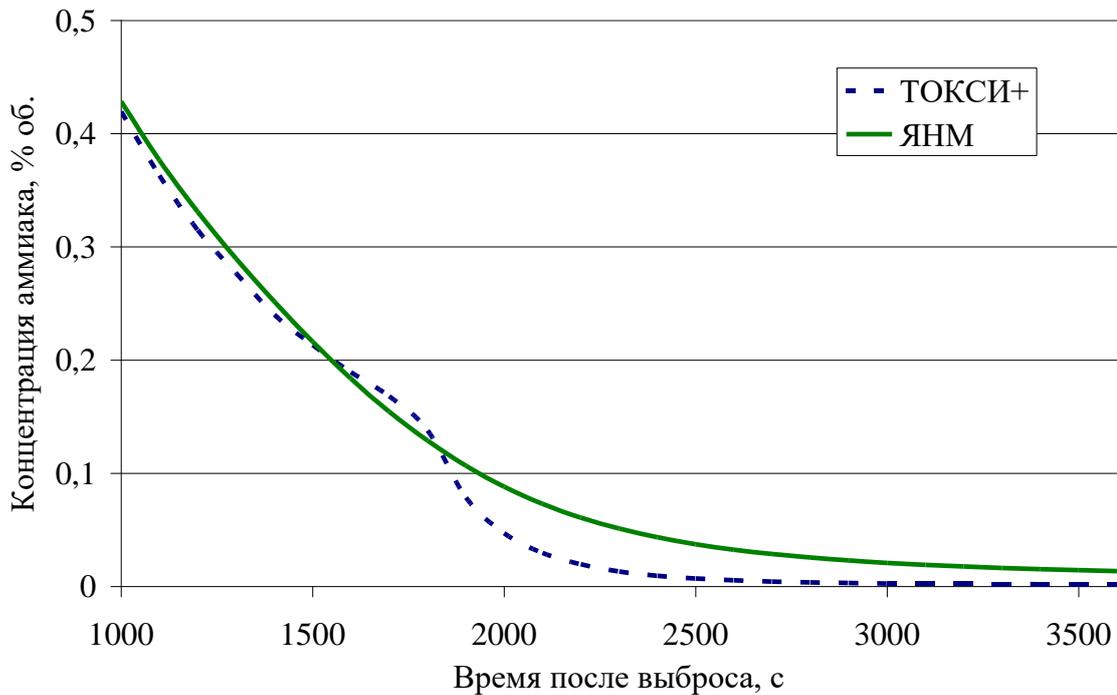


Рис. 4.20. Изменение концентрации аммиака во времени для точки 1200 м от места аварии по оси ветра

Для улучшения наглядности представления рассчитанные концентрации (C) в принятых в программе ТОКСИ+ единицах измерения ($\text{кг}/\text{м}^3$) были преобразованы в % от объема ($C_{\%}$) с использованием соответствующего коэффициента пересчета для аммиака:

$$C_{\%} = 141,2 \cdot C \quad (4.3)$$

Сравнительный анализ профилей, полученных в результате ячеечно-нейросетевого моделирования и по программам ТОКСИ+, показывает, что ЯНМ сглаживает концентрационный профиль и с увеличением времени после аварии зачастую дает незначительно более высокие значения концентраций. В то же время максимальная абсолютная ошибка составляет около 0,1 % об. — для расстояния 900 м от места выброса и не превышает 0,05 % об. — для расстояния 1200 м от места выброса, что является очень хорошим результатом. Таким образом, можно заключить, что методика [64] и ЯНМ позволяют получить очень близкие между собой результаты.

Данный вывод подтверждается также результатами оценки границ зон порогового и смертельного поражения с помощью ячеечно-нейросетевого моделирования.

Полученные профили позволяют численно оценить значения токсодоз, получаемых людьми, находящимися в зоне аварии, при различном времени экспозиции (рис. 4.21 – 4.22).

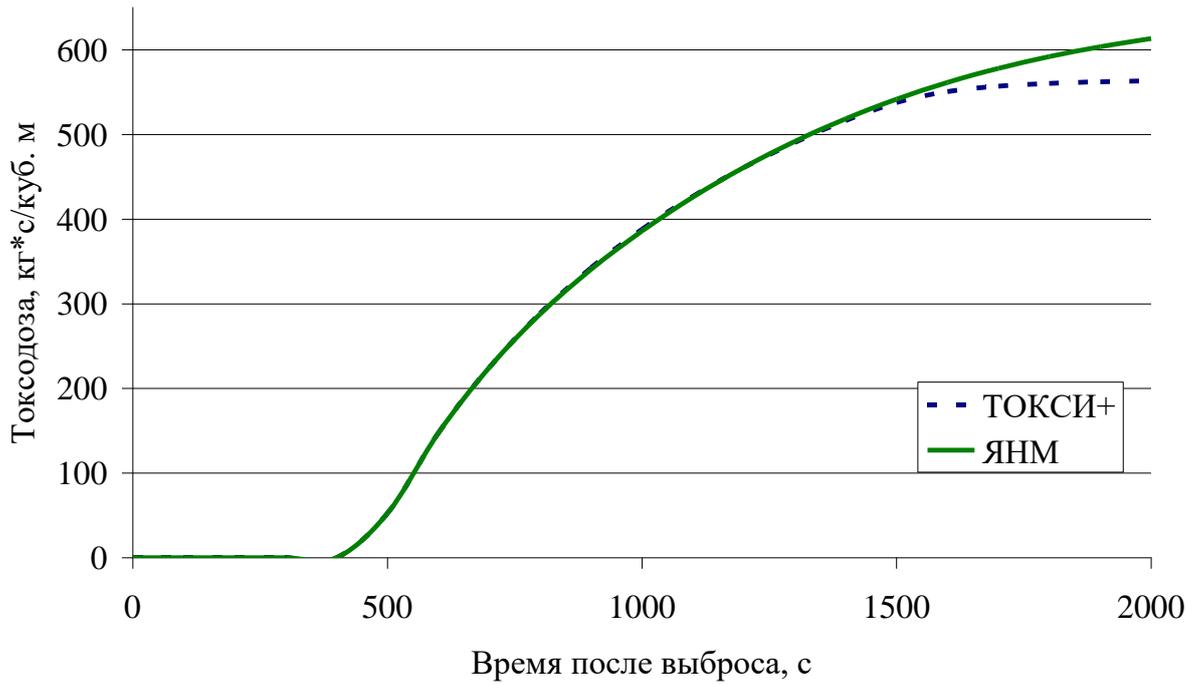


Рис. 4.21. Зависимость токсодозы, полученной человеком, неподвижно находящимся в одной точке на расстоянии 900 м от места аварии по оси ветра, от времени после аварии

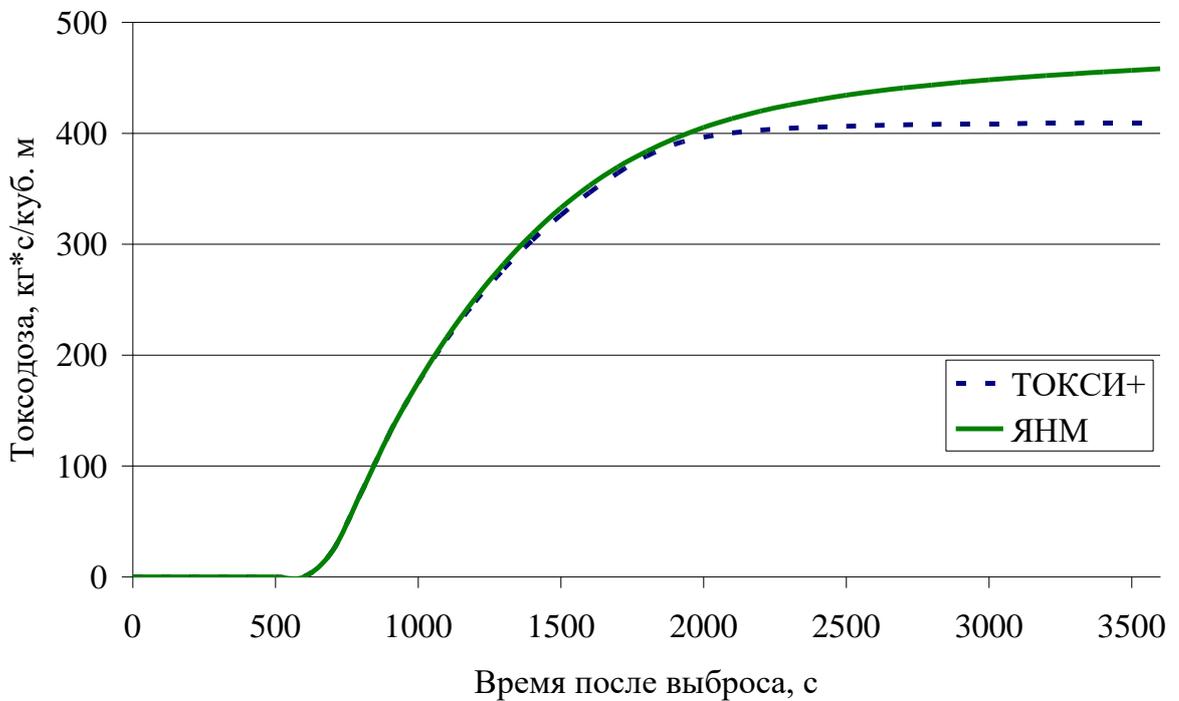


Рис. 4.22. Зависимость токсодозы, полученной человеком, неподвижно находящимся в одной точке на расстоянии 1200 м от места аварии по оси ветра, от времени после аварии

Из рис. 4.21 и 4.22 видно, что оценки токсодоз, получаемые по программе ТОКСИ+ и с помощью ячеечно-нейросетевого моделирования, близки в первой половине времени экспозиции и незначительно расходятся при его повышении. Для рассмотренного примера получено небольшое превышение токсодоз, рассчитанных с помощью ячеечно-нейросетевого моделирования, на 5,7 % – для 30-минутной экспозиции и на 11,7 % – для 60-минутной экспозиции. Последнее обстоятельство объясняется обнаруженным ранее небольшим по величине положительным отклонением концентрации, рассчитанной по ЯНМ в сравнении с программой ТОКСИ+.

Вместе с тем, очевидно, что полученные уровни токсодоз в точках 900 м при 30-минутной экспозиции и 1200 м при 60-минутной экспозиции значительно превышают не только пороговые, но и смертельные значения ($9 \text{ кг}\cdot\text{с}/\text{м}^3$), указанные в статье [67] и получаемые при расчете по программе ТОКСИ+.

Как отмечается в [67], в результате аварии в Потчефструме погибли 18 человек из примерно 50 пострадавших, находившихся на территории производства, причем все они оказались в рассчитанной зоне смертельного поражения, то есть результаты моделирования соответствуют реально имевшим место фактам.

4.3. Принятие решений по оценке последствий аварийного выброса на промышленном объекте с использованием информационной системы «ЯНСКА»

Одно из главных направлений использования разработанной ИС «ЯНСКА» – принятие решений по результатам ОВОС аварийного выброса. В данном случае она выполняет функции информационно-моделирующей и ситуационной советующей системы. Возможность получения результатов ОВОС аварийного выброса с помощью ЯНМ, заложенных в нее, заранее обученных или оперативно полученных, с учетом актуальных внешних условий и их прогноза на заданный период времени обеспечивает моделирующую функцию ИС «ЯНСКА» в системе ППР. Возможность анализа полученных результатов моделирования и генерации вариантов возможных решения в той или иной ситуации с количественной оценкой их эффективности, предъявляемых ЛПР, обеспечивает советующую функцию.

К перечню задач, связанных с необходимостью принятия решений в экстренных ситуациях, которые могут быть решены на практике с использованием разработанной ИС «ЯНСКА», относятся:

- принятие решений по минимизации размеров ЗЗ в результате промышленной аварии с выбросом ОХВ;

- принятие решений по ликвидации последствий аварийного выброса ОХВ;
- принятие решений по минимизации экологического, экономического и социального ущербов от промышленной аварии с выбросом ОХВ;
- принятие решений по оповещению территориальных служб экстренного реагирования, производственного персонала и населения прилегающих жилых районов по результатам ОВОС аварийного выброса ОХВ;
- принятие решений по эвакуации производственного персонала и населения прилегающих жилых районов с учетом результатов оценки зон и уровней токсического поражения людей в результате промышленной аварии с выбросом ОХВ.

Каждая из перечисленных задач требует не только применения специальных знаний, методической базы и официальных нормативных документов, но и использования специализированного информационного и программно-алгоритмического обеспечения, которое можно получить с помощью разработанной системы «ЯНСКА» или при последующем расширении перечня ее функций. Для демонстрации ее возможностей при решении задач принятия решений по результатам ОВОС аварийного выброса рассмотрим решение задачи эвакуации производственного персонала с территории предприятия, подвергшейся токсическому заражению.

В качестве основного метода для решения данной задачи использован метод анализа альтернатив, рассмотренный в п. 3.4. При его реализации анализируются различные варианты путей эвакуации персонала, а также уровень токсического поражения, который может быть получен отдельным реципиентом при каждом из них. Таким образом, уровень токсического поражения (величина токсодозы) является главным критерием при выборе оптимального решения.

Задача принятия решений по эвакуации производственного персонала с территории предприятия, подвергшейся токсическому заражению, ставится следующим образом: требуется найти такой оптимальный маршрут эвакуации, который обеспечит наименьшее значение токсодозы, полученной каждым эвакуируемым сотрудником производства [111]. Исходная информация по токсодозе получается в результате оценки последствий конкретной аварии с использованием ИС «ЯНСКА» аналогично примерам, рассмотренным в п. 4.2. Дополнительно учитываемыми факторами являются:

- пространственные ограничения в виде застройки территории, наличия заграждений и расположенного на путях эвакуации промышленного оборудования;
- количественный состав производственного персонала, влияющий на

- время пребывания (выхода) на зараженной территории;
- проведение синхронной эвакуации с других точек промышленного объекта.

Оценка токсодозы, полученной персоналом на пути эвакуации, складывается из шаговых токсодоз, полученных во время пребывания в каждой ячейке пространства, подвергшейся химическому заражению. Повторяя допущение об одинаковом уровне концентрации ЗВ внутри ячейки, ранее сделанное при ячеечно-нейросетевом моделировании, получим численную оценку токсодозы (Ct_{50i}) в каждой ячейке с номером i на пути эвакуации как произведение концентрации на время пребывания в ней:

$$Ct_{50i} = C_i \Delta\tau_i \quad (4.4)$$

где C_i – концентрация в ячейке с номером i ; $\Delta\tau_i$ – фактическое время пребывания в ячейке с номером i .

Фактическое время пребывания определяется направлением движения из данной ячейки в процессе эвакуации. Если это движение прямолинейное (между соседними ячейками, имеющими общую грань), то фактическое время пребывания равно базовому времени (τ_6) – отношению длины стороны ячейки к скорости движения ($\tau_i = 1,00\tau_6$). Если осуществляется диагональное перемещение между ячейками, имеющими одинаковые координаты только лишь для одной вершины, то фактическое время пребывания увеличивается на 41 % по сравнению с базовым временем ($\tau_i = 1,41\tau_6$). Данные коэффициенты актуальны только для равномерно упорядоченных квадратных ячеек (рис. 4.23), для других форм и порядков расположения ячеек коэффициенты могут быть иными.

Суммарная полученная токсодоза Ct_{50} по всем n ячейкам на пути эвакуации составит:

$$Ct_{50} = \sum_{i=1}^n Ct_{50i} \quad (4.5)$$

Следует обратить внимание, что не только местоположение эвакуируемого персонала изменяется во времени, но также и величина концентрации ЗВ в соответствующей ячейке. Этот факт тоже следует иметь в виду альтернативном выборе из приемлемых решений. Рассмотрим пример анализа альтернатив и выбора решения, проиллюстрированный в виде трех последовательных этапов на рис. 4.23.

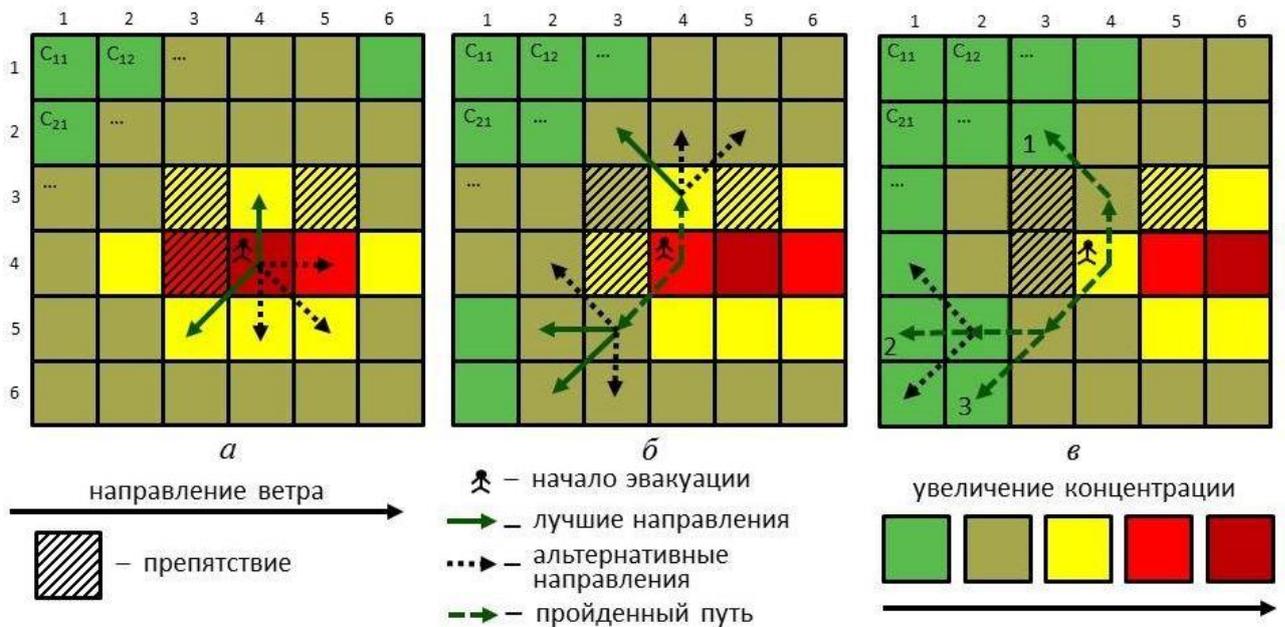


Рис. 4.23. Этапы формирования маршрута эвакуации на основе алгоритма метода анализа альтернатив

В момент начала эвакуации (рис. 4.23, а) возможны 8 различных направлений движения. Три из них сразу исключаются из рассмотрения как не удовлетворяющие пространственным ограничениям (препятствия). Для оставшихся альтернатив рассчитываются значения шаговой токсодозы по соотношению (4.4). В результате расчетов из 5 оставшихся вариантов 2 были признаны лучшими (приемлемыми), так как дали наименьшее значение шаговой токсодозы. Величина шаговой токсодозы добавляется к суммарной токсодозе (критерию оптимальности) соответствующего маршрута. Далее новые ячейки рассматриваются независимо друг от друга (рис. 4.23, б): они используются как ячейки отправления, а окружающие их ячейки – как возможные варианты направлений движения. При этом из рассмотрения сразу исключаются не только ячейки с препятствиями, но и ячейки, смежные с предыдущим местонахождением, в которые, будь они приемлемыми, можно было бы попасть за один предыдущий шаг. Таким образом, на каждом шаге расчета любой вариант местонахождения дает одно или несколько альтернативных направлений, что в результате приводит к нескольким десятками и даже сотням альтернативных решений, формирующихся до момента окончания маршрута в ячейке с безопасным уровнем загрязнения.

Для окончательного принятия решений по эвакуации производственного персонала в результате промышленной аварии с выбросом ОХВ должностным лицом требуется применение специальных методов и средств совместной визуализации плана (карты) местности с возможными маршрутами движения, графическими

результатами оценки зоны токсического поражения, динамики изменения зоны поражения в процессе эвакуации.

Рассмотрим численный пример расчета и альтернативного выбора варианта маршрута эвакуации производственного персонала, адаптированный под иллюстрацию, приведенную на рис. 4.23. Для определения суммарной токсодозы потребуются значения концентрации ЗВ, рассчитанные в дискретные моменты времени с использованием программно-алгоритмического обеспечения ИС «ЯНСКА». Эти данные представлены в таблице 4.13.

Таблица 4.13

**Результаты оценки концентрации загрязняющего вещества в
информационной системе «ЯНСКА»**

| Условные координаты ячейки | Концентрация ЗВ, мг/м ³ | | |
|-----------------------------|------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| | $\tau=1$ (рис. 4.23, а) | $\tau=2$ (рис. 4.23, б) | $\tau=\{3, 4\}$ (рис. 4.23, в) |
| 1, 5 (окончание, вариант 2) | 1,5 | 0,5 | 0,2 |
| 2, 5 | 2,5 | 1,5 | 0,5 |
| 2, 6 (окончание, вариант 3) | 2,0 | 1,0 | 0,5 |
| 3, 2 (окончание, вариант 1) | 1,5 | 1,0 | 0,5 |
| 3, 5 | 4,5 | 3,0 | 1,5 |
| 4, 3 | 5,0 | 3,5 | 2,0 |
| 4, 4 (начало эвакуации) | 10,0 | 7,0 | 4,5 |

В ячейках с координатами (3, 3), (5, 3) и (3, 4) расположены препятствия различных видов, в связи с чем они не рассматриваются и не включаются в возможный маршрут эвакуации.

Результаты оценки дискретных токсодоз по соотношению (4.4) приведены ниже с учетом базового временного шага дискретизации $\tau_6=10$ мин:

- в дискретный момент времени $\tau = 1$:
 $Ct_{50(4,4)} = 10,0 \text{ мг / м}^3 \cdot 10 \text{ мин} = 100,0 \text{ мг мин / м}^3$;
- в дискретный момент времени $\tau = 2$:
 $Ct_{50(3,5)} = 7,0 \text{ мг / м}^3 \cdot 1,41 \cdot 10 \text{ мин} = 98,7 \text{ мг мин / м}^3$;
 $Ct_{50(4,3)} = 3,5 \text{ мг / м}^3 \cdot 10 \text{ мин} = 35,0 \text{ мг мин / м}^3$;
- в дискретный момент времени $\tau = 3$:
 $Ct_{50(2,5)} = 0,5 \text{ мг / м}^3 \cdot 10 \text{ мин} = 5,0 \text{ мг мин / м}^3$;

$$Ct_{50(2,6)} = 0,5 \text{ мг / м}^3 \cdot 1,41 \cdot 10 \text{ мин} = 7,1 \text{ мг мин / м}^3;$$

$$Ct_{50(3,2)} = 0,5 \text{ мг / м}^3 \cdot 1,41 \cdot 10 \text{ мин} = 7,1 \text{ мг мин / м}^3;$$

– в дискретный момент времени $\tau = 4$:

$$Ct_{50(1,5)} = 0,2 \text{ мг / м}^3 \cdot 10 \text{ мин} = 2,0 \text{ мг мин / м}^3.$$

Суммарная токсодоза, рассчитанная по соотношению (4.5), для каждого из трех предложенных системой вариантов маршрутов эвакуации составит:

– маршрут 1 [(4, 4) – (4, 3) – (3, 2)]:

$$Ct_{50} = 100,0 + 35,0 + 7,1 = 142,1 \text{ мг мин / м}^3;$$

– маршрут 2 [(4, 4) – (3, 5) – (2, 5) – (1, 5)]:

$$Ct_{50} = 100,0 + 98,7 + 5,0 + 2,0 = 205,7 \text{ мг мин / м}^3;$$

– маршрут 3 [(4, 4) – (3, 5) – (2, 6)]:

$$Ct_{50} = 100,0 + 98,7 + 7,1 = 205,8 \text{ мг мин / м}^3.$$

Остальные варианты маршрута эвакуации исключаются системой из рекомендационного списка в процессе расчета в связи с тем, что они дают заведомо завышенные, а значит неприемлемые значения токсодоз, получаемых производственным персоналом.

Таким образом, система предлагает для рассмотренного примера три варианта маршрута эвакуации. Маршрут 1 как наиболее оптимальный следует считать приемлемым и рекомендуемым системой ЛПР. Маршруты 2 и 3, равноценные в пределах точности расчета, предлагаются системой как малоприемлемые запасные варианты решения на случай необходимости принять во внимание дополнительные факторы и обстоятельства, которые не могут быть учтены системой ППР.

Представленный пример рассматривает всего три шага дискретизации и минимальное количество вариантов решения. Средства компьютерного моделирования и ППР позволяют значительно уменьшить временной и пространственный масштабы решения данной задачи. Следует, однако, учитывать, что эта возможность объективно ограничивается условиями дискретизации ЯНМ, используемых для расчета концентраций и токсодоз.

4.4. Выводы

В результате рассмотрения примеров практического использования ИС «ЯНСКА» для компьютерного анализа последствий аварийного загрязнения атмосферы промышленными источниками следует отметить:

1. Выполнена ОВОС аварийного выброса аммиака для гипотетического промышленного ИЗА при постоянных и переменных метеоусловиях с использованием различных ЯНМ.
2. Проведен сравнительный анализ структур двухслойных перцептронов в использованных ЯНМ. Даны рекомендации по использованию структуры с 12 нейронами в скрытом слое как наиболее простой структуры, обеспечивающей достаточную точность решения задачи.
3. Проведено исследование влияния настроек алгоритма обучения перцептрона на качество обучения. Показано, что увеличение продолжительности обучения и числа скрытых нейронов способствуют повышению точности ЯНМ.
4. Также доказано, что учет изменения метеоусловий в процессе рассеяния примеси позволяет значительно повысить точность результатов, предлагаемых системой, и, как следствие, повысить эффективность принимаемых решений на основе рекомендаций системы.
5. С использованием ИС «ЯНСКА» получены результаты ОВОС реальной химической аварии. Проведено сравнение с результатами, полученными по известным методикам, многократно подтвердившим свою эффективность. Подтверждена адекватность полученных результатов реальной картине.
6. Рассмотрен пример процедуры принятия решений по эвакуации производственного персонала с зараженной территории на основе данных оценки последствий химической аварии, предоставляемых ИС «ЯНСКА» ЛПР.

Заключение и основные замечания

В рамках представленной диссертационной работы необходимо отметить следующие заключительные моменты:

1. Выполнен СА химических производств как источников опасности для производственного персонала и населения при аварийных выбросах в атмосферу.
2. Разработаны ЯНМ оценки последствий аварийного загрязнения атмосферы при стационарных и изменяющихся метеоусловиях и обобщенная ЯНМ для восстановления поля концентрации и динамики его изменения.
3. Разработан алгоритм принятия решений по оценке последствий аварийного загрязнения атмосферы для организации эвакуации производственного персонала.
4. Определены ОВОС гипотетических аварий и результаты верификации разработанных ЯНМ на примерах ранее произошедших аварий.
5. Показана возможность практического использования ЯНМ и ИС для оценки последствий аварийного загрязнения атмосферы при стационарных и переменных метеоусловиях;
6. Проведено сравнение полученных с помощью компьютерной системы «ЯНСКА» результатов с результатами расчетной методики ТОКСИ-3 и подтверждена адекватность разработанных ЯНМ;
7. Показана возможность использования результатов, получаемых с помощью системы, для принятия решений в случае ЧС на химическом производстве для определения оптимального маршрута эвакуации производственного персонала при авариях.

Следует также отметить большой спектр перспективных направлений исследования и развития ИС «ЯНСКА», а также ее непосредственного использования для научных исследований и решения прикладных задач.

Перечень принятых сокращений

- АХОВ – аварийно химически опасное вещество;
БД – база данных;
ЗВ – загрязняющее вещество;
ЗЗ – зона загрязнения;
ИЗА – источник загрязнения атмосферы;
ИИ – искусственный интеллект;
ИНС – искусственная нейронная сеть;
ИС – информационная система;
ЛПР – лицо, принимающее решение;
ОВОС – оценка воздействия на окружающую среду;
ОДЗ – область допустимых значений;
ОС – окружающая среда;
ОХВ – опасное химическое вещество;
ПДК – предельно допустимая концентрация;
ПО – программное обеспечение;
ППР – поддержка принятия решений;
СА – системный анализ;
СДЯВ – сильнодействующее ядовитое вещество;
СУБД – система управления базами данных;
ХОО – химически опасный объект;
ЧС – чрезвычайная ситуация;
ЯНМ – ячеечно-нейросетевая модель;
ЯНСКА – ячеечно-нейросетевая система компьютерного анализа.

Перечень основных обозначений

- a – размер грани ячейки;
 C, C_i – концентрация загрязняющего вещества (в ячейке i), кг/м³;
 Ct_{50}, Ct_{50i} – токсодоза (в ячейке i);
 d – допустимое отклонение показателя равномерного распределения примеров по поддиапазнам входных данных;
 D_i – показатель распределения примеров в поддиапазоне i ;
 E – ошибка обучения;
 l – характеристический размер ячейки;
 L – длина поддиапазона, в котором изменяются входные переменные;
 M_k – количество использований k -го примера для обучения;
 n – количество входных переменных;
 N – количество нейронов в скрытом слое;
 N_k – количество копий k -го примера в выборке;
 N_{sd} – количество поддиапазонов переменных, используемое для оценки репрезентативности выборки;
 $N_{\text{вых}}$ – количество выходных переменных;
 $N_{\text{об}}$ – количество примеров в обучающей выборке;
 $N_{\text{ср}}$ – среднее количество примеров в поддиапазоне;
 s – состояние нейрона;
 S_c – площадь основания ячейки (для двухмерных моделей);
 t – номер итерации (шаг расчета);
 T – номер такта обучения;
 u – скорость ветра, м/с;
 v – коэффициент скорости обучения нейронной сети;
 V_c – объем ячейки (для трехмерных моделей);
 w – направление ветра, градусы;
 w_{ij} – весовой (синаптический) коэффициент между нейронами i и j ;
 W – матрица весовых (синаптических) коэффициентов;
 x – входная переменная в исходных единицах измерения или нормализованная входная переменная;
 $x_i^{\text{Left}}, x_i^{\text{Right}}$ – границы i -го поддиапазона изменения входных переменных;
 x_{\min}, x_{\max} – минимальное и максимальное значения среди элементов входного вектора;
 X – входной вектор;

X_{min}, X_{max} – заданные границы диапазона изменения входного сигнала в исходных единицах измерения;

y – выходная переменная в исходных единицах измерения или нормализованная выходная переменная;

y^p – рассчитанное значение выходной переменной;

$y^э$ – экспериментальное значение выходной переменной;

Y – выходной вектор;

α – параметр насыщения активационной функции;

δ – невязка нейрона;

Δw – поправка весового коэффициента;

$\Delta \tau$ – фактическое время пребывания в ячейке;

τ – дискретный момент времени;

τ_0 – базовое время пребывания в ячейке;

φ_k – частота присутствия k -го примера в выборке;

ψ_k – частота использования k -го примера для обучения.

Список используемой литературы

1. Мешалкин В. П. Основы информатизации и математического моделирования экологических систем / В. П. Мешалкин, О. Б. Бутусов, А. Г. Гнаук // М.: ИНФРА. – 2010. – 357 с.
2. Бутусов О. Б. Компьютерное моделирование радиоактивного загрязнения окружающей среды при разрушениях геологических хранилищ радиоактивных отходов с учетом неопределенности / О. Б. Бутусов, В. П. Мешалкин, Д. В. Попов, Д. А. Тюкаев // Теоретические основы химической технологии. – 2013. – Т. 47. – № 6. – 639 с.
3. Израэль Ю. А. Экология и контроль состояния природной среды // М.: Гидрометеиздат. – 1984. – 560 с.
4. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды // М.: Наука. – 1982. – 320 с.
5. Егоров А. Ф. Анализ риска, оценка последствий аварий и управление безопасностью химических, нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств / А. Ф. Егоров, Т. В. Савицкая // М.: КолосС. – 2010. – 526 с.
6. Панарин В. М. Математическое описание информационной системы мониторинга загрязнения атмосферы / В. М. Панарин, А. А. Горюнкова, Н. А. Телегина, А. А. Белоусов // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2013. – № 3 (105). – с. 25–28.
7. Кантюков Р. А. Автоматизированная система мониторинга состояния окружающей среды / Р. А. Кантюков, Р. К. Гимранов, И. В. Рыженков, Р. Р. Кантюков, В. П. Мешалкин, В. М. Панарин, А. А. Горюнкова // Химическая промышленность сегодня. – 2015. – № 3. – с. 25–32.
8. Берлянд М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы // Л.: Гидрометеиздат. – 1987. – 93 с.
9. Горский В. Г. Анализ аварийного риска и обеспечение безопасности химически опасных объектов / В. Г. Горский, Т. Н. Швецова-Шиловская, В. В. Кирсанов, Г. Ф. Терещенко // Химическая промышленность. – 2002. – № 4. – с. 3–16.
10. Горский В. Г. Методология оценки аварийного риска на опасных химических объектах / В. Г. Горский, Т. Н. Швецова-Шиловская, Г. Ф. Терещенко, А. В. Путилов // Химическая технология. – 2002. – № 10. – 7 с.
11. Barai S. V. Neural Networks Models for Air Quality Prediction: A Comparative

- Study / S. V. Barai, A. K. Dikshit, S. Sharma // *Soft Computing in Industrial Applications*, 2007, V. 39, pp. 290–305.
12. Chelani A. B. Prediction of sulphur dioxide concentration using artificial neural networks / A. B. Chelani, C. V. Chalapati Rao, K. M. Phadke, M. Z. Hasan // *Environmental Modelling & Software*, 2002, V. 17, pp. 161–168.
 13. Sahin U. A. Modeling of SO₂ Distribution in Istanbul Using Artificial Neural Networks / U. A. Sahin, O. N. Ucan, C. Bayat, N. Ozturun // *Environmental Modeling and Assessment*, 2005, V. 10, pp. 135–142.
 14. Pasquill, F. Atmospheric Dispersion Parameters in Gaussian Plume Modeling // *Triangle Park: U. S. Environmental Protection Agency*, 1976. – 225 p.
 15. Hanna S. R. A simple dispersion model for the analysis of chemically reactive pollutants // *Atmos. Environ.*, 1973, V. 7, № 8, pp. 803–817.
 16. Маршалл В. Основные опасности химических производств // М.: Издательство «Мир». – 1989. – 672 с.
 17. Штраус В. Контроль загрязнения воздушного бассейна / В. Штраус, С. Д. Мэйнуорринг // М.: Стройиздат, 1989. – 144 с.
 18. Антропов К. М. Математические модели загрязнения атмосферного воздуха мегаполиса и промышленного центра выбросами автотранспорта и промышленных предприятий // дис. ... канд. физ.-мат. наук. Институт промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, 2012. – 194 с.
 19. Барт А. А. Математическое моделирование загрязнения городского воздуха источниками антропогенной и биогенной эмиссии // дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томский государственный университет, Томск, 2014. – 132 с.
 20. Хачунц Д. С. Математическое моделирование процессов переноса загрязняющих веществ в многокомпонентной воздушной среде в прибрежной зоне // дис. ... канд. физ.-мат. наук. Южный федеральный университет, Таганрог, 2013. – 168 с.
 21. Мухаметшина Е. С. Математические модели и алгоритмы расчетного экологического мониторинга качества атмосферного воздуха // дис. ... канд. техн. наук. Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева, Казань, 2016. – 197 с.
 22. Горюноква А. А. Информационно-измерительная система построения полей загрязнения атмосферного воздуха промышленно развитых территорий // дис. ... докт. техн. наук. Тульский государственный университет, Тула, 2015. – 258 с.

23. Ильинская А. В. Система автоматизированного мониторинга качества воздуха рабочей зоны предприятий лёгкой промышленности // дис. ... канд. техн. наук. Московский государственный университет дизайна и технологии, Москва, 2013. – 149 с.
24. Михайлова Е. А. Многофакторное прогнозирование выбросов загрязняющих веществ на региональном уровне // дис. ... канд. техн. наук. Байкальский государственный университет экономики и права, Иркутск, 2012. – 128 с.
25. Мошев Е. Р. Информационно-эвристическо-вычислительные модели и алгоритмы принятия решений по интегрированной логистической поддержке трубопроводных систем нефтехимических предприятий // дис. ... докт. техн. наук. Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева, ПНИПУ, Москва, 2015. – 468 с.
26. Степанченко И. В. Поддержка принятия решений для задач экологического мониторинга атмосферного воздуха в городах // дис. ... докт. техн. наук. Южный федеральный университет, Волгоград, 2015. – 236 с.
27. Луэ Ху Дык. Разработка интеллектуальной системы снижения валового выброса загрязняющих веществ в атмосферу химико-технологическими предприятиями // дис. ... канд. техн. наук. Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева, Москва, 2016. – 138 с.
28. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2014 году». – М.: Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. – 2015. – 473 с.
29. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2013 году». – М.: Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. – 2014. – 463 с.
30. Ежегодник «Состояние загрязнения атмосферы в городах на территории России за 2014 г.». – СПб.: Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (РОСГИДРОМЕТ). – 2015. – 287 с.
31. Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2013 год. – М.: Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (РОСГИДРОМЕТ). – 2014. – 228 с.
32. Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2014 год. – М.: Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (РОСГИДРОМЕТ). – 2015. – 199 с.
33. Качество воздуха в крупнейших городах России за десять лет (1998–2007 гг.): Аналитический обзор. – СПб.: Главная геофизическая обсерватория

- им. А. И. Воейкова Росгидромета. – 2009. – 133 с.
34. Экономика России, цифры и факты. Часть 9 Химическая промышленность [загл. с экрана] // Портал трейдеров [электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://utmagazine.ru/posts/10562-ekonomika-rossii-cifry-i-fakty-chast-9-himicheskaya-promyshlennost>, свободный. – 02.07.2015.
 35. Учебник спасателя / С. К. Шойгу, М. И. Фалеев, Г. Н. Кириллов и др.; под общ. ред. Ю. Л. Воробьева. – 2-е изд., перераб. и доп. – Краснодар: «Сов. Кубань». – 2002. – 528 с.
 36. Лебедева М. И. Аналитический обзор статистики по опасным событиям на объектах нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности / М. И. Лебедева, А. В. Богданов, Ю. Ю. Колесников // Технологии техносферной безопасности. – 2013. – № 4 (50). – 8 с.
 37. Взрывопожароопасные и химически опасные объекты / Управление общепромышленного надзора. Информационный бюллетень Федеральной службы. – 2012. – №2 (59). – 25 с.
 38. ГОСТ 17.2.1.04-77. Охрана природы. Атмосфера. Источники и метеорологические факторы загрязнения, промышленные выбросы. Термины и определения. – Изд. стандартов. – 1984.
 39. Егоров А. Ф. Управление безопасностью химических производств на основе новых информационных технологий / А. Ф. Егоров, Т. В. Савицкая. // М.: Химия, КолосС. – 2006. – 416 с.
 40. Эльтерман В. М. Вентиляция химических производств: 3-е изд., перераб. // М.: Химия. – 1980. – 288 с.
 41. Егоров А. Ф. Разработка интегрированной системы контроля и управления качеством атмосферного воздуха / А. Ф. Егоров, Т. В. Савицкая, Д. П. Вент, Ю. Д. Эдельштейн, О. В. Дмитриева // Химическая промышленность. – 1999. – № 6. – с. 53–64.
 42. Егоров А. Ф. Идентификация источников загрязнения атмосферного воздуха с использованием методов распознавания образов. Часть 1. Математическая постановка и алгоритм решения задачи идентификации постоянно действующих источников загрязнения / А. Ф. Егоров, Т. В. Савицкая, Т. Ю. Барковская // Химическая промышленность. – 2001. – № 9. – с. 31–39.
 43. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий (ОНД-86) / Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова Росгидромета // Л.: гидрометеиздат. – 1997. – 76 с.

44. Термины МЧС [загл. с экрана] // МЧС России [электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mchs.gov.ru/dop/terms/item/87790/>, свободный. – 02.07.2015.
45. Хабибуллин И. И. Определение токсодозы с учетом движения человека при авариях на химически опасных объектах / И. И. Хабибуллин, В. С. Гасилов, С. И. Поникаров // Вестник Казанского технологического университета. – 2006. – № 4. – с. 243–246.
46. Попов Н. С. Основные направления в моделировании загрязнения воздушного бассейна за рубежом / Н. С. Попов, В. И. Бодров, В. Л. Перов // Химическая промышленность за рубежом. – 1982. – №6.
47. Берлянд М. Е. О методах определения фонового загрязнения атмосферы в городах / М. Е. Берлянд, Э. Ю. Безуглая и др. // Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова Росгидромета. – 1984. – №479. – с. 17–30.
48. Ивахненко А. Г. Самоорганизация прогнозирующих моделей / А. Г. Ивахненко, Й. А. Мюллер // Совместное изд. – Киев: Техника, 1985; Берлин: ФЭБ Ферлаг Техник, 1984. – 223 с.
49. Кочерга Ю. Л. Минимаксное прогнозирование в классе линейных моделей при интервальных ограничениях // Автоматика. – 1991. – №5. – с. 80–86.
50. Рапута В. Ф. Модель длительного загрязнения местности аэрозольными источниками // Оптика атмосферы и океана. – 1997. – №6. – с. 616–622.
51. Егоров А. Ф. Прогнозирование загрязнения атмосферного воздуха с использованием математического аппарата нейронных сетей / А. Ф. Егоров, А. Г. Гапончук, Т. В. Савицкая, В. Н. Богатиков, О. В. Лысенко // Сборник Кольского научного центра РАН: Институт информатики и математического моделирования технического моделирования технологических процессов. Управление безопасностью природно-промышленных систем. – Выпуск 1. Апатиты. – 1998. – с. 26–32.
52. Дударов С. П. Ячеечно-нейросетевые модели в задачах экологической безопасности / С. П. Дударов, П. Л. Папаев, А. Н. Кудряшов, Ю. А. Карибова // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2011. – № 2. – с. 31–39.
53. Дударов С. П. Оценка последствий химических аварий на опасных производственных объектах с использованием ячейочно-нейросетевых моделей / С. П. Дударов, П. Л. Папаев, А. В. Колосов // Безопасность труда в промышленности – 2012. – № 3. – с. 64–70.

54. Исаев В. С. Аварийно химически опасные вещества / В. С. Исаев, В. А. Владимиров // Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования. – 2012. – № 1. – Том 2 – с. 618–655.
55. ГН 2.2.5.1313-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны. – Российская газета. – № 119/1. – 2003.
56. ГН 2.1.6.1338-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест. – Российская газета. – № 119/1. – 2003.
57. Ахрем А. А. Математические методы анализа адекватности моделей сложных технических объектов // Труды ИСА РАН. – 2007. – т. 29. – с. 245–264.
58. Сумской С. И. Верификация методик оценки последствий аварийных выбросов газа от источников продолжительного действия / С. И. Сумской, А. В. Пчельников, М. В. Лисанов, А. С. Печеркин, В. А. Шаргатов // Безопасность труда в промышленности. – 2005. – № 8. – с. 28.
59. Шаталов А. А. Методика расчета распространения аварийных выбросов, основанная на модели рассеяния тяжелого газа / А. А. Шаталов, М. В. Лисанов, А. С. Печеркин и др. // Безопасность труда в промышленности. – 2004. – № 9. – с. 46–52.
60. Губин С. А. Верификация методик для расчета рассеяния токсических выбросов / С. А. Губин, С. М. Лыков, И. В. Маклашова и др. // Химическая промышленность. – 1999. – № 10. – с. 58–66.
61. Дегтярев Д. В. Совершенствование методического обеспечения оценки последствий аварий на опасных производственных объектах / Д. В. Дегтярев, М. В. Лисанов, А. С. Печеркин и др. // Докл. и выступл. II научно-практическая конференция "Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций", 23 окт. 2002 г. – М.: Едиториал УРСС. – 2003. – с. 317–324.
62. Замышляев Б. В. Влияние начальных размеров объемных источников выброса (истечения) невесомой примеси на оценку концентрационных полей, возникающих при распространении облаков гауссова типа // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2004. – № 4. – с. 35–72.
63. Методика прогноза и оценки химической обстановки при авариях на аммиачных ХОО г. Москвы // АНО "Ассоциация "Содействие защите населения". – М.: 2003. – 87 с.
64. Методика оценки последствий химических аварий (Методика «Токси». Редакция 2.2) // Методики оценки последствий аварий на опасных производственных объектах: Сборник документов. Серия 27. Выпуск 2 / Колл. авт. – М.: НТЦ

- «Промышленная безопасность», 2005. – 208 с., с. 123–206.
65. McQuaid J. Design of the Thorney Island Continuous Release Trials // *Journal of Hazardous Materials*. – Vol. 16. – 1987. – p. 1–8.
 66. Mercer A., Nussey C. The Thorney Island Continuous Release Trials: mass and flux balances. // *Journal of Hazardous Materials*. – Vol. 16. – 1987. – p. 9–20.
 67. Сумской С. И. Сравнение результатов моделирования аварийных выбросов опасных веществ с фактами аварий / С. И. Сумской, К. В. Ефремов, М. В. Лисанов, А. С. Софьин // *Безопасность труда в промышленности*. – 2008 – № 10. – с. 38–46.
 68. Лисанов М. В. Сравнение результатов расчетов последствий аварийных выбросов опасных веществ по программным комплексам ТОКСИ+ и PHAST / М. В. Лисанов, К. В. Ефремов, С. И. Сумской, В. А. Пантелеев // *Безопасность труда в промышленности*. – 2011. – № 2. – с. 56–60.
 69. Collision of Norfolk Southern Freight Train 192 With Standing Norfolk Southern Local Train P22 With Subsequent Hazardous Materials Release at Graniteville, South Carolina January 6, 2005. NTSB/RAR-05/04 PB2005-916304 Notation 7710A 490, 2005.
 70. Информация об авариях, происшедших на предприятиях химического комплекса за 10 мес. 2003 г. / Гостехнадзор России. Информационная бюллетень. – 2003. – с. 2–25.
 71. Информация о групповых несчастных случаях и несчастных случаях со смертельным исходом, происшедших в 2002 г. на предприятиях химического комплекса / Гостехнадзор России. Информационная бюллетень. – 2002. – № 3. – с. 37–49.
 72. Егоров А. Ф. Использование искусственных нейронных сетей для прогнозирования загрязнения атмосферного воздуха промышленными источниками выбросов опасных химических веществ / А. Ф. Егоров, Т. В. Савицкая, С. П. Дударов // *Химическая технология*. – 2004. – № 1. – с. 35–42.
 73. Савицкая Т. В. Использование искусственных нейронных сетей для прогнозирования загрязнения атмосферного воздуха аварийными источниками при изменяющихся метеоусловиях / Т. В. Савицкая, С. П. Дударов, С. А. Левушкина, А. Ф. Егоров, А. С. Левушкин // *Экологические системы и приборы*. – 2007. – № 10. – с. 45–50.
 74. Дударов С. П. Нейросетевые модели прогнозирования аварийного загрязнения воздуха при переменных метеоусловиях / С.П. Дударов, С.А. Трофимов // *Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-20: сб. трудов XX*

- Междунар. науч. конф. В 10 т. Т. 3. Секции 3, 4. – Ярославль: Изд-во Яросл. гос. техн. ун-та. – 2007. – с. 156–158.
75. Егоров А. Ф. Использование искусственных нейронных сетей для идентификации промышленных источников загрязнения атмосферного воздуха. Часть 1. Идентификация организованных постоянно действующих источников загрязнения / А. Ф. Егоров, Т. В. Савицкая, С. П. Дударов // Химическая промышленность сегодня. – 2004. – №6. – с. 39–45.
76. Дударов С. П. Идентификация источников загрязнения воздуха как задача кластеризации с помощью нейронных сетей Кохонена / С. П. Дударов, В. В. Плужников // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-23: сб. трудов XXIII Междунар. науч. конф., секция 4. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т. – 2010. – с. 106–107.
77. Плужников В. В. Идентификация постоянно действующих источников загрязнения химических производств с помощью самоорганизующихся карт / В. В. Плужников, С. П. Дударов // Успехи в химии и химической технологии: сб. науч. тр. Том XXIII, № 1 (94). – М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева. – 2009. – с. 16–20.
78. Дударов С. П. Ячеечно-нейросетевые модели оценки загрязнения атмосферного воздуха / С. П. Дударов, А. В. Колосов // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-22: сб. трудов XXII Междунар. науч. конф., секции 6, 7. – Псков: Изд-во Псков. гос. политехн. ин-та. – 2009. – с. 21–23.
79. Sahin U. A. Application of Cellular Neural Network to the Prediction of Missing Air Pollutant Data / U. A. Sahin, C. Bayat, O. N. Ucan // Atmospheric Research, 2011, V. 101, I. 1–2, pp. 314–326.
80. Ozcan H. K. Modeling of Tropospheric Ozone Concentrations Using Genetically Trained Multi-Level Cellular Neural Networks / H. K. Ozcan, E. Bilgili, U. A. Sahin, O. N. Ucan, C. Bayat // Advances in Atmospheric Sciences, 2007, V. 24, No. 5, pp. 907–914.
81. РД 52.04.253–90. Руководящий документ. Методика прогнозирования масштабов заражения сильнодействующими ядовитыми веществами при авариях (разрушениях) на химически опасных объектах и транспорте // Л.: Гидрометеоиздат. – 1990. – 24 с.
82. Моделирование аварийных ситуаций на опасных производственных объектах. Программный комплекс ТОКСИ+ (версия 3.0): Сборник документов. Серия 27. Выпуск 5 / Колл. Авт // М.: Открытое акционерное общество «Научно-технический центр по безопасности в промышленности». – 2006. – 252 с.

83. Егоров А. Ф. Программные средства анализа и оценки негативных воздействий источников выбросов опасных химических веществ / А. Ф. Егоров, Т. В. Савицкая, С. А. Лёвушкина, С. П. Дударов // Экономика природопользования. – 2008. – № 2. – с. 53–125.
84. Дударов С. П. Учебный программный модуль расчета концентраций вредных веществ в атмосферном воздухе / С. П. Дударов, А. Ф. Егоров, Т. В. Савицкая, С. А. Левушкина // Безопасность в техносфере. – 2008. – № 1. – с. 53–56.
85. Дударов С. П. Разработка информационно-моделирующей системы для анализа и оценки последствий аварий на химических предприятиях: диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук: 05.13.01 / С. П. Дударов // М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева. – 2002. – 237 с.
86. Егоров А. Ф. Информационная система нейросетевого моделирования загрязнения воздуха промышленными источниками на основе генетического алгоритма обучения / А. Ф. Егоров, С. П. Дударов, А. С. Левушкин // Химическая промышленность сегодня. – 2009. – № 12. – с. 21–29.
87. Дударов С. П. Оценка последствий аварийного загрязнения воздуха с использованием программных средств нейросетевого моделирования / С. П. Дударов, А. С. Левушкин // Безопасность в техносфере. – 2010. – № 1. – с. 7–11.
88. Кафаров В. В. Системный анализ процессов химической технологии. Основы стратегии / В. В. Кафаров, И. Н. Дорохов // М.: Наука. – 1976. – 500 с.
89. Герасимов Б. И. Основы теории системного анализа: качество и выбор / Б. И. Герасимов, Г. Л. Попова, Н. В. Злобина // Тамбов: Изд. ФГБОУ ВПО «ТГТУ». – 2011. – 80 с.
90. Методические указания по расчету валовых выбросов вредных веществ в атмосферу для предприятий нефтепереработки и нефтехимии (РД-17-89) / Всесоюзный научно-исследовательский институт углеводородного сырья // М.: тип. ХОЗУ миннефтехимпрома СССР. – 1990. – 62 с.
91. Методика прогнозирования масштабов заражения сильнодействующими ядовитыми веществами при авариях (разрушениях) на химически опасных объектах и транспорте (РД 52.04.253–90) / Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова Росгидромета // СПб.: Библиотека интеграла. – 2000. – 25 с.
92. Методика расчета осредненных за длительный период концентраций выбрасываемых в атмосферу вредных веществ (Дополнение к ОНД-86) // СПб.: Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова Росгидромета. – 2005. – 17 с.

93. Методика оценки последствий аварийных выбросов опасных веществ (Методика «Токси»). Редакция 3.1) / Колл. авт. – М.: НТЦ «Промышленная безопасность». – 2005. – 67 с.
94. Методические указания по оценке последствий аварийных выбросов опасных веществ (РД-03-26–2007). Серия 27. Выпуск 6 / Колл. авт. – М.: НТЦ «Промышленная безопасность». – 2008. – 124 с.
95. Расчет выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух и определение размера вреда окружающей природной среде при авариях на магистральных газопроводах (СТО Газпром 2-1.19-530-2011) / Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий – Газпром ВНИИГАЗ // М.: Газпром экспо. – 2011. – 93 с.
96. Владимиров В. А. Методика прогнозирования и оценки обстановки при выбросах в окружающую среду хлора и других аварийно химически опасных веществ / В. А. Владимиров, В. С. Исаев // Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования. – 2012. – № 1. – Том 2 – с. 656–676.
97. Рыбка Н. А. Методика оценки масштабов и последствий химических аварий // Технологии техносферной безопасности. – 2013. – Выпуск №2 (48). – 4 с.
98. Беляев В. Ю. Нахождение оптимального маршрута эвакуации населения в случае угрозы аварии на химически опасных объектах / В. Ю. Беляев, А. М. Яковлев // Проблемы надзвичайних ситуацій. Збірка наукових праць. – 2014. – Випуск 20. – с. 21–27.
99. Дударов С. П. Теоретические основы и практическое применение искусственных нейронных сетей / С. П. Дударов, П. Л. Папаев // М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева. – 2014. – 104 с.
100. Rumelhart D. E. Learning representation by back-propagating error / D. E. Rumelhart, G. E. Hinton, R. G. Williams // Nature, 1986, №323, pp.533–536.
101. Каллан Р. Основные концепции нейронных сетей // Москва, Санкт-Петербург, Киев: Издательский дом «Вильямс», 2001. – 287 с.
102. Дударов С. П. Информационная система ячеечно-нейросетевого моделирования последствий химических аварий на опасных производственных объектах / С. П. Дударов, П. Л. Папаев // Системы и средства информатики, 2016. – Т. 26, № 2. – с. 123–135
103. Тоффоли Т. Машины клеточных автоматов/ Т. Тоффоли, Н. Маргулис. – М.: Мир, 1991. – 280 с.
104. Папаев П. Л. Типовые ячеечно-нейросетевые модели рассеяния загрязняющего вещества в результате аварийного выброса / П. Л. Папаев, С. П. Дударов

- // Международная научно-практическая конференция молодых ученых по проблемам техносферной безопасности в рамках первой всероссийской Недели охраны труда: материалы конференции. – М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2015. – с. 96–97.
105. Папаев П. Л. Алгоритм обучения искусственных нейронных сетей на основе больших выборок с повторяющимися примерами / П. Л. Папаев, С. П. Дударов // Успехи в химии и химической технологии: сб. науч. тр. Том XXIX, № 4. – М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева. – 2015. – с. 12–15.
106. Ахназарова С. Л. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии / С. Л. Ахназарова, В. В. Кафаров // 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк. – 1985. – 327 с., ил.
107. Папаев П. Л. Разработка организационной и функциональной структур информационно-моделирующей системы для оценки последствий аварий на химических производствах с использованием ячеечно-нейросетевых моделей / П. Л. Папаев, С. П. Дударов // Успехи в химии и химической технологии: сб. науч. тр. Том XXVII, № 1. – М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2013. – с. 51–56.
108. Эддоус М. Методы принятия решений / М. Эддоус, Р. Стэнсфилд // Пер. с англ. под ред. член.-корр. РАН И. И. Елисеевой. – М.: Аудит, ЮНИТИ. – 1997. – 590 с.
109. Дударов С. П. Разработка программного обеспечения с использованием современных языков и средств программирования // М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2018. – 116 с.
110. Дударов С. П. Алгоритмизация принятия решений на основе процедур нечётко-логического вывода в условиях неопределённости / С. П. Дударов, П. Л. Папаев // От фундаментальных исследований к коммерциализации научных идей: Сборник материалов российско-швейцарского семинара. – М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева. – 2016. – с. 26–28.
111. Папаев П. Л. Принятие решений о маршруте эвакуации производственного персонала на основе метода анализа альтернатив / П. Л. Папаев, С. П. Дударов // Успехи в химии и химической технологии: сб. науч. тр. Том XXXI, № 8. – М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева. – 2017. – с. 54–56.

Приложение 1. Универсальная выборка

| w, град. | u, м/с | C7 (t-2) | C3 (t-1) | C6 (t-1) | C7 (t-1) | C8 (t-1) | C11 (t-1) | C1 (t) | C2 (t) | C3 (t) | C4 (t) | C5 (t) | C6 (t) | C7 (t) | C8 (t) | C9 (t) | C10 (t) | C11 (t) | C12 (t) | C13 (t) |
|----------|--------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0 | 0,5 | 3,65E-08 | 1,64E-10 | 3,26E-08 | 6,67E-09 | 8,02E-10 | 1,60E-07 | 4,21E-13 | 1,15E-10 | 2,84E-11 | 4,37E-12 | 1,24E-08 | 4,87E-09 | 1,20E-09 | 1,84E-10 | 1,78E-11 | 1,29E-07 | 3,16E-08 | 4,87E-09 | 5,23E-07 |
| 0 | 0,5 | 2,15E-07 | 1,68E-09 | 3,46E-08 | 3,46E-08 | 2,47E-08 | 5,09E-07 | 9,45E-12 | 2,69E-10 | 2,69E-10 | 1,98E-10 | 4,16E-09 | 5,64E-09 | 5,64E-09 | 4,16E-09 | 2,26E-09 | 8,73E-08 | 8,73E-08 | 6,44E-08 | 9,96E-07 |
| 0 | 0,5 | 2,39E-06 | 4,55E-10 | 3,60E-07 | 1,18E-07 | 1,28E-08 | 1,01E-05 | 2,98E-14 | 5,51E-11 | 2,15E-11 | 3,28E-12 | 1,55E-08 | 1,55E-08 | 6,05E-09 | 9,24E-10 | 5,51E-11 | 1,70E-06 | 6,65E-07 | 1,02E-07 | 2,86E-05 |
| 0 | 0,5 | 1,01E-07 | 2,19E-09 | 1,26E-08 | 2,67E-08 | 4,41E-08 | 2,54E-07 | 3,85E-11 | 3,00E-10 | 5,95E-10 | 9,39E-10 | 1,48E-09 | 3,69E-09 | 7,32E-09 | 1,16E-08 | 1,45E-08 | 3,62E-08 | 7,18E-08 | 1,13E-07 | 5,60E-07 |
| 0 | 0,5 | 2,33E-06 | 2,88E-09 | 4,65E-08 | 1,87E-07 | 3,74E-07 | 6,04E-06 | 2,32E-12 | 8,71E-11 | 2,91E-10 | 5,33E-10 | 9,75E-10 | 5,97E-09 | 2,00E-08 | 3,65E-08 | 3,65E-08 | 2,23E-07 | 7,47E-07 | 1,37E-06 | 1,53E-05 |
| 0 | 0,5 | 3,37E-06 | 1,01E-07 | 1,58E-06 | 9,10E-07 | 3,99E-07 | 6,26E-06 | 2,19E-09 | 4,41E-08 | 2,67E-08 | 1,26E-08 | 5,37E-07 | 4,18E-07 | 2,54E-07 | 1,20E-07 | 4,41E-08 | 3,09E-06 | 1,88E-06 | 8,86E-07 | 1,08E-05 |
| 0 | 0,5 | 1,01E-05 | 2,60E-07 | 7,32E-05 | 4,36E-06 | 1,02E-07 | 2,86E-05 | 7,47E-10 | 4,67E-07 | 4,18E-08 | 1,67E-09 | 5,83E-05 | 1,17E-05 | 1,04E-06 | 4,18E-08 | 7,47E-10 | 1,30E-04 | 1,17E-05 | 4,67E-07 | 5,83E-05 |
| 0 | 0,5 | 3,47E-12 | 2,03E-07 | 1,20E-05 | 2,64E-08 | 7,59E-12 | 4,48E-10 | 1,65E-07 | 1,32E-04 | 2,39E-06 | 1,13E-08 | 7,29E-03 | 2,23E-04 | 1,64E-06 | 2,33E-09 | 6,47E-13 | 4,33E-05 | 3,18E-07 | 4,54E-10 | 1,20E-08 |
| 0 | 0,5 | 6,57E-02 | 4,89E-08 | 5,38E-06 | 5,93E-04 | 5,93E-04 | 6,53E-02 | 6,68E-17 | 2,00E-12 | 6,21E-11 | 6,21E-11 | 6,21E-11 | 5,98E-08 | 1,86E-06 | 1,86E-06 | 5,98E-08 | 5,77E-05 | 1,79E-03 | 1,79E-03 | 5,56E-02 |
| 0 | 0,5 | 3,81E-05 | 9,57E-07 | 2,93E-06 | 8,98E-06 | 1,89E-05 | 5,79E-05 | 1,26E-08 | 6,78E-08 | 1,86E-07 | 3,64E-07 | 1,86E-07 | 7,12E-07 | 1,95E-06 | 3,82E-06 | 5,35E-06 | 5,35E-06 | 1,47E-05 | 2,87E-05 | 7,87E-05 |
| 0 | 0,5 | 7,05E-04 | 3,18E-07 | 2,23E-04 | 4,33E-05 | 1,64E-06 | 1,15E-03 | 1,41E-11 | 4,32E-08 | 1,13E-08 | 7,81E-10 | 9,09E-06 | 9,09E-06 | 2,39E-06 | 1,65E-07 | 2,98E-09 | 5,03E-04 | 1,32E-04 | 9,09E-06 | 1,91E-03 |
| 0 | 0,5 | 4,32E-34 | 8,78E-08 | 1,02E-10 | 1,17E-13 | 1,57E-19 | 1,81E-22 | 5,93E-04 | 6,53E-02 | 5,93E-04 | 4,89E-08 | 5,93E-04 | 5,93E-04 | 5,38E-06 | 4,44E-10 | 3,32E-16 | 4,89E-08 | 4,44E-10 | 3,66E-14 | 3,32E-16 |
| 0 | 0,5 | 7,46E-05 | 3,97E-06 | 1,78E-05 | 2,29E-05 | 2,29E-05 | 1,03E-04 | 1,42E-07 | 8,83E-07 | 1,11E-06 | 1,11E-06 | 3,47E-06 | 5,48E-06 | 6,89E-06 | 6,89E-06 | 5,48E-06 | 2,71E-05 | 3,40E-05 | 3,40E-05 | 1,34E-04 |
| 0 | 0,5 | 1,35E-04 | 1,35E-05 | 6,27E-05 | 5,17E-05 | 3,52E-05 | 1,64E-04 | 9,37E-07 | 5,52E-06 | 4,62E-06 | 3,24E-06 | 2,28E-05 | 2,28E-05 | 1,91E-05 | 1,34E-05 | 7,87E-06 | 7,89E-05 | 6,61E-05 | 4,64E-05 | 1,92E-04 |
| 0 | 0,5 | 1,38E-09 | 7,32E-05 | 6,65E-07 | 1,70E-06 | 1,70E-06 | 1,55E-08 | 7,29E-03 | 6,52E-04 | 1,46E-03 | 1,46E-03 | 1,17E-05 | 5,83E-05 | 1,30E-04 | 1,30E-04 | 5,83E-05 | 2,33E-06 | 5,22E-06 | 5,22E-06 | 9,34E-08 |
| 0 | 0,5 | 1,29E-03 | 1,43E-04 | 1,49E-03 | 5,84E-04 | 1,43E-04 | 1,49E-03 | 4,75E-06 | 8,76E-05 | 3,81E-05 | 1,09E-05 | 7,03E-04 | 4,63E-04 | 2,02E-04 | 5,78E-05 | 1,09E-05 | 1,62E-03 | 7,03E-04 | 2,02E-04 | 1,62E-03 |
| 0 | 0,5 | 2,57E-13 | 9,18E-05 | 2,03E-07 | 2,03E-07 | 2,64E-08 | 5,83E-11 | 3,03E-02 | 5,89E-03 | 5,89E-03 | 1,15E-03 | 4,33E-05 | 2,23E-04 | 2,23E-04 | 4,33E-05 | 1,64E-06 | 1,64E-06 | 1,64E-06 | 3,18E-07 | 2,33E-09 |
| 0 | 0,5 | 2,41E-03 | 2,16E-04 | 5,91E-04 | 8,27E-04 | 8,27E-04 | 2,27E-03 | 8,39E-06 | 3,84E-05 | 5,21E-05 | 5,21E-05 | 9,57E-05 | 1,76E-04 | 2,39E-04 | 2,39E-04 | 1,76E-04 | 5,95E-04 | 8,06E-04 | 8,06E-04 | 2,01E-03 |
| 0 | 0,5 | 1,87E-07 | 1,71E-04 | 2,80E-05 | 1,53E-05 | 4,57E-06 | 7,47E-07 | 3,72E-03 | 2,19E-03 | 1,29E-03 | 4,48E-04 | 4,48E-04 | 4,48E-04 | 2,64E-04 | 9,15E-05 | 1,87E-05 | 5,39E-05 | 3,18E-05 | 1,10E-05 | 2,25E-06 |
| 0 | 0,5 | 1,46E-03 | 7,85E-04 | 1,95E-04 | 1,57E-03 | 6,32E-03 | 1,57E-03 | 5,12E-05 | 5,12E-05 | 3,13E-04 | 1,05E-03 | 1,53E-05 | 1,71E-04 | 1,05E-03 | 3,51E-03 | 6,42E-03 | 3,13E-04 | 1,92E-03 | 6,42E-03 | 1,92E-03 |
| 0 | 0,5 | 4,44E-03 | 1,48E-03 | 3,69E-03 | 2,72E-03 | 1,48E-03 | 3,69E-03 | 2,24E-04 | 8,89E-04 | 6,75E-04 | 3,89E-04 | 2,03E-03 | 2,03E-03 | 1,54E-03 | 8,89E-04 | 3,89E-04 | 3,52E-03 | 2,67E-03 | 1,54E-03 | 3,52E-03 |
| 0 | 0,5 | 7,32E-05 | 1,46E-03 | 3,26E-03 | 6,52E-04 | 5,83E-05 | 1,30E-04 | 7,85E-04 | 6,32E-03 | 1,57E-03 | 1,95E-04 | 1,27E-02 | 6,32E-03 | 1,57E-03 | 1,95E-04 | 1,21E-05 | 3,15E-03 | 7,85E-04 | 9,75E-05 | 1,95E-04 |
| 0 | 0,5 | 1,49E-03 | 5,63E-03 | 5,63E-03 | 3,72E-03 | 1,62E-03 | 1,62E-03 | 3,51E-03 | 7,39E-03 | 5,09E-03 | 2,41E-03 | 7,39E-03 | 7,39E-03 | 5,09E-03 | 2,41E-03 | 7,89E-04 | 5,09E-03 | 3,51E-03 | 1,66E-03 | 1,66E-03 |
| 0 | 0,5 | 5,98E-08 | 3,80E-03 | 1,55E-06 | 2,81E-04 | 3,80E-03 | 1,55E-06 | 7,05E-04 | 9,18E-05 | 5,41E-03 | 4,16E-02 | 2,03E-07 | 9,18E-05 | 5,41E-03 | 4,16E-02 | 4,16E-02 | 1,20E-05 | 7,05E-04 | 5,41E-03 | 1,20E-05 |
| 0 | 0,5 | 2,81E-04 | 5,41E-03 | 9,18E-05 | 5,41E-03 | 4,16E-02 | 7,05E-04 | 4,33E-05 | 4,33E-05 | 1,15E-03 | 5,89E-03 | 1,64E-06 | 2,23E-04 | 5,89E-03 | 3,03E-02 | 3,03E-02 | 2,23E-04 | 5,89E-03 | 3,03E-02 | 1,15E-03 |
| 0 | 0,5 | 7,29E-03 | 2,45E-02 | 2,45E-02 | 2,45E-02 | 8,04E-03 | 8,04E-03 | 1,23E-03 | 8,04E-03 | 8,04E-03 | 3,14E-03 | 8,04E-03 | 2,06E-02 | 2,06E-02 | 8,04E-03 | 1,23E-03 | 2,06E-02 | 2,06E-02 | 8,04E-03 | 8,04E-03 |
| 0 | 0,5 | 1,31E-10 | 4,84E-02 | 1,28E-06 | 4,84E-02 | 4,84E-02 | 1,28E-06 | 1,02E-10 | 8,78E-08 | 7,60E-05 | 7,60E-05 | 1,02E-10 | 7,60E-05 | 6,57E-02 | 6,57E-02 | 7,60E-05 | 7,60E-05 | 6,57E-02 | 6,57E-02 | 7,60E-05 |

| w, град. | u, м/с | C7 (t-2) | C3 (t-1) | C6 (t-1) | C7 (t-1) | C8 (t-1) | C11 (t-1) | C1 (t) | C2 (t) | C3 (t) | C4 (t) | C5 (t) | C6 (t) | C7 (t) | C8 (t) | C9 (t) | C10 (t) | C11 (t) | C12 (t) | C13 (t) |
|-------------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0 | 1 | 2,04E-08 | 3,26E-10 | 1,50E-09 | 2,19E-09 | 2,82E-09 | 1,29E-08 | 4,69E-12 | 2,57E-11 | 3,61E-11 | 4,53E-11 | 1,12E-10 | 1,77E-10 | 2,48E-10 | 3,11E-10 | 3,49E-10 | 1,08E-09 | 1,52E-09 | 1,91E-09 | 8,34E-09 |
| 0 | 1 | 9,31E-09 | 4,09E-10 | 2,02E-09 | 1,74E-09 | 1,38E-09 | 6,82E-09 | 1,76E-11 | 9,28E-11 | 8,08E-11 | 6,56E-11 | 4,27E-10 | 3,99E-10 | 3,47E-10 | 2,82E-10 | 2,13E-10 | 1,60E-09 | 1,39E-09 | 1,13E-09 | 5,20E-09 |
| 0 | 1 | 9,51E-08 | 9,22E-10 | 7,62E-09 | 7,62E-09 | 6,47E-09 | 5,35E-08 | 7,81E-12 | 7,70E-11 | 7,70E-11 | 6,68E-11 | 5,71E-10 | 6,59E-10 | 6,59E-10 | 5,71E-10 | 4,29E-10 | 4,88E-09 | 4,88E-09 | 4,23E-09 | 3,13E-08 |
| 0 | 1 | 5,74E-08 | 1,44E-09 | 6,64E-09 | 7,36E-09 | 7,36E-09 | 3,39E-08 | 3,20E-11 | 1,68E-10 | 1,84E-10 | 1,84E-10 | 7,34E-10 | 8,82E-10 | 9,68E-10 | 9,68E-10 | 8,82E-10 | 4,22E-09 | 4,63E-09 | 4,63E-09 | 2,02E-08 |
| 0 | 1 | 1,14E-07 | 2,19E-09 | 1,67E-08 | 1,29E-08 | 8,85E-09 | 6,74E-08 | 3,61E-11 | 3,11E-10 | 2,48E-10 | 1,77E-10 | 2,14E-09 | 1,91E-09 | 1,52E-09 | 1,08E-09 | 6,88E-10 | 1,05E-08 | 8,34E-09 | 5,94E-09 | 4,08E-08 |
| 0 | 1 | 1,96E-07 | 3,18E-09 | 1,33E-08 | 2,04E-08 | 2,72E-08 | 1,14E-07 | 4,28E-11 | 2,23E-10 | 3,26E-10 | 4,20E-10 | 9,01E-10 | 1,50E-09 | 2,19E-09 | 2,82E-09 | 3,20E-09 | 8,85E-09 | 1,29E-08 | 1,67E-08 | 6,74E-08 |
| 0 | 1 | 1,63E-06 | 7,34E-08 | 2,22E-07 | 2,67E-07 | 2,92E-07 | 8,83E-07 | 2,66E-09 | 9,31E-09 | 1,10E-08 | 1,20E-08 | 2,76E-08 | 3,55E-08 | 4,20E-08 | 4,56E-08 | 4,56E-08 | 1,24E-07 | 1,47E-07 | 1,60E-07 | 4,74E-07 |
| 0 | 1 | 6,54E-06 | 7,90E-08 | 5,89E-07 | 4,89E-07 | 3,37E-07 | 2,61E-06 | 7,84E-10 | 7,62E-09 | 6,47E-09 | 4,51E-09 | 5,16E-08 | 5,16E-08 | 4,39E-08 | 3,17E-08 | 1,95E-08 | 3,08E-07 | 2,62E-07 | 1,89E-07 | 1,33E-06 |
| 0 | 1 | 2,56E-05 | 8,41E-07 | 3,05E-06 | 3,52E-06 | 3,52E-06 | 1,27E-05 | 1,90E-08 | 8,69E-08 | 9,87E-08 | 9,87E-08 | 3,09E-07 | 3,99E-07 | 4,53E-07 | 4,53E-07 | 3,99E-07 | 1,61E-06 | 1,83E-06 | 1,83E-06 | 6,51E-06 |
| 0 | 1 | 7,19E-05 | 1,87E-06 | 1,20E-05 | 8,27E-06 | 4,73E-06 | 3,04E-05 | 3,29E-08 | 2,72E-07 | 1,96E-07 | 1,21E-07 | 1,62E-06 | 1,38E-06 | 9,96E-07 | 6,12E-07 | 3,19E-07 | 5,94E-06 | 4,30E-06 | 2,64E-06 | 1,58E-05 |
| 0 | 1 | 2,79E-04 | 4,01E-06 | 2,31E-05 | 2,31E-05 | 1,80E-05 | 1,03E-04 | 2,57E-08 | 2,20E-07 | 2,20E-07 | 1,77E-07 | 1,22E-06 | 1,51E-06 | 1,51E-06 | 1,22E-06 | 7,95E-07 | 8,42E-06 | 8,42E-06 | 6,79E-06 | 3,78E-05 |
| 0 | 1 | 4,96E-05 | 3,04E-06 | 7,53E-06 | 9,44E-06 | 1,06E-05 | 2,62E-05 | 1,28E-07 | 3,92E-07 | 4,80E-07 | 5,32E-07 | 9,81E-07 | 1,33E-06 | 1,63E-06 | 1,81E-06 | 1,81E-06 | 4,09E-06 | 5,01E-06 | 5,55E-06 | 1,39E-05 |
| 0 | 1 | 1,95E-03 | 3,14E-05 | 1,29E-04 | 1,83E-04 | 1,83E-04 | 7,49E-04 | 1,32E-07 | 1,04E-06 | 1,39E-06 | 1,39E-06 | 4,52E-06 | 8,15E-06 | 1,09E-05 | 1,09E-05 | 8,15E-06 | 4,77E-05 | 6,40E-05 | 6,40E-05 | 2,79E-04 |
| 0 | 1 | 1,84E-03 | 8,65E-05 | 1,24E-03 | 4,27E-04 | 8,65E-05 | 1,24E-03 | 2,38E-07 | 7,36E-06 | 3,12E-06 | 8,61E-07 | 9,66E-05 | 6,29E-05 | 2,67E-05 | 7,36E-06 | 1,32E-06 | 3,50E-04 | 1,48E-04 | 4,10E-05 | 5,38E-04 |
| 0 | 1 | 7,77E-04 | 9,45E-05 | 1,67E-04 | 2,23E-04 | 2,57E-04 | 4,56E-04 | 5,73E-06 | 1,39E-05 | 1,80E-05 | 2,04E-05 | 2,63E-05 | 3,85E-05 | 4,96E-05 | 5,63E-05 | 5,63E-05 | 9,36E-05 | 1,21E-04 | 1,37E-04 | 2,58E-04 |
| 0 | 1 | 1,87E-14 | 2,12E-06 | 9,48E-09 | 7,21E-08 | 2,79E-07 | 1,25E-09 | 1,24E-03 | 8,65E-05 | 4,27E-04 | 1,24E-03 | 2,09E-06 | 1,75E-05 | 8,65E-05 | 2,51E-04 | 4,27E-04 | 2,09E-06 | 1,03E-05 | 2,98E-05 | 7,20E-07 |
| 0 | 1 | 1,18E-08 | 6,36E-05 | 2,21E-05 | 1,09E-05 | 3,79E-06 | 1,32E-06 | 1,63E-03 | 1,63E-03 | 9,06E-04 | 3,75E-04 | 9,06E-04 | 6,75E-04 | 3,75E-04 | 1,55E-04 | 4,77E-05 | 2,08E-04 | 1,15E-04 | 4,77E-05 | 2,65E-05 |
| 0 | 1 | 1,04E-15 | 1,81E-05 | 5,41E-06 | 4,80E-07 | 1,27E-08 | 3,79E-09 | 1,20E-03 | 7,07E-03 | 1,20E-03 | 8,32E-05 | 7,07E-03 | 2,91E-03 | 4,92E-04 | 3,42E-05 | 9,78E-07 | 4,92E-04 | 8,32E-05 | 5,78E-06 | 5,78E-06 |
| 0 | 1 | 1,81E-05 | 1,20E-03 | 8,32E-05 | 1,20E-03 | 7,07E-03 | 4,92E-04 | 3,18E-05 | 3,18E-05 | 2,42E-04 | 9,35E-04 | 8,21E-06 | 1,23E-04 | 9,35E-04 | 3,62E-03 | 7,12E-03 | 2,42E-04 | 1,84E-03 | 7,12E-03 | 1,84E-03 |
| 0 | 1 | 5,38E-04 | 2,16E-03 | 4,36E-03 | 2,16E-03 | 7,49E-04 | 1,52E-03 | 3,75E-04 | 1,63E-03 | 9,06E-04 | 3,75E-04 | 3,95E-03 | 2,94E-03 | 1,63E-03 | 6,75E-04 | 2,08E-04 | 3,95E-03 | 2,19E-03 | 9,06E-04 | 2,19E-03 |
| 0 | 1 | 3,75E-04 | 2,07E-03 | 2,65E-03 | 1,61E-03 | 7,61E-04 | 9,77E-04 | 9,44E-04 | 2,23E-03 | 1,45E-03 | 7,61E-04 | 3,42E-03 | 2,76E-03 | 1,80E-03 | 9,44E-04 | 4,00E-04 | 2,76E-03 | 1,80E-03 | 9,44E-04 | 1,45E-03 |
| 0 | 1 | 1,46E-07 | 5,38E-04 | 6,29E-05 | 9,66E-05 | 9,66E-05 | 1,13E-05 | 6,20E-03 | 3,07E-03 | 4,36E-03 | 4,36E-03 | 7,49E-04 | 1,52E-03 | 2,16E-03 | 2,16E-03 | 1,52E-03 | 5,27E-04 | 7,49E-04 | 7,49E-04 | 1,83E-04 |
| 0 | 1 | 7,79E-06 | 3,58E-03 | 2,00E-03 | 1,18E-03 | 4,06E-04 | 2,38E-04 | 2,99E-03 | 7,06E-03 | 4,60E-03 | 1,86E-03 | 6,74E-03 | 6,74E-03 | 4,39E-03 | 1,86E-03 | 5,13E-04 | 4,39E-03 | 2,86E-03 | 1,21E-03 | 1,21E-03 |
| 0 | 1 | 2,80E-08 | 1,84E-03 | 2,42E-04 | 2,42E-04 | 1,23E-04 | 1,62E-05 | 1,04E-02 | 1,04E-02 | 1,04E-02 | 6,10E-03 | 3,58E-03 | 6,10E-03 | 6,10E-03 | 3,58E-03 | 1,24E-03 | 2,11E-03 | 2,11E-03 | 1,24E-03 | 4,27E-04 |
| 0 | 2 | 5,50E-07 | 2,07E-09 | 8,05E-09 | 9,78E-09 | 1,08E-08 | 4,19E-08 | 6,12E-12 | 2,89E-11 | 3,40E-11 | 3,69E-11 | 1,16E-10 | 1,48E-10 | 1,75E-10 | 1,90E-10 | 1,90E-10 | 7,01E-10 | 8,26E-10 | 8,96E-10 | 3,60E-09 |
| 0 | 2 | 1,68E-05 | 2,65E-08 | 1,30E-07 | 1,50E-07 | 1,50E-07 | 7,31E-07 | 2,33E-11 | 1,52E-10 | 1,70E-10 | 1,70E-10 | 7,81E-10 | 9,87E-10 | 1,11E-09 | 1,11E-09 | 9,87E-10 | 5,72E-09 | 6,43E-09 | 6,43E-09 | 3,31E-08 |
| 0 | 2 | 2,18E-04 | 8,05E-08 | 6,79E-07 | 6,79E-07 | 5,36E-07 | 4,52E-06 | 1,37E-11 | 1,76E-10 | 1,76E-10 | 1,46E-10 | 1,56E-09 | 1,87E-09 | 1,87E-09 | 1,56E-09 | 1,08E-09 | 1,66E-08 | 1,66E-08 | 1,39E-08 | 1,23E-07 |
| 0 | 2 | 2,80E-05 | 4,86E-07 | 1,65E-06 | 1,41E-06 | 1,10E-06 | 3,75E-06 | 4,67E-09 | 1,88E-08 | 1,64E-08 | 1,33E-08 | 6,62E-08 | 6,17E-08 | 5,37E-08 | 4,35E-08 | 3,29E-08 | 1,89E-07 | 1,64E-07 | 1,33E-07 | 4,67E-07 |
| 0 | 2 | 7,83E-04 | 2,22E-06 | 5,73E-06 | 1,17E-05 | 1,88E-05 | 4,84E-05 | 1,08E-09 | 5,58E-09 | 9,64E-09 | 1,39E-08 | 2,00E-08 | 4,14E-08 | 7,14E-08 | 1,03E-07 | 1,23E-07 | 2,55E-07 | 4,41E-07 | 6,35E-07 | 2,27E-06 |

| w, град. | u, м/с | C7 (t-2) | C3 (t-1) | C6 (t-1) | C7 (t-1) | C8 (t-1) | C11 (t-1) | C1 (t) | C2 (t) | C3 (t) | C4 (t) | C5 (t) | C6 (t) | C7 (t) | C8 (t) | C9 (t) | C10 (t) | C11 (t) | C12 (t) | C13 (t) |
|-------------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0 | 2 | 8,10E-03 | 4,39E-05 | 2,18E-04 | 2,18E-04 | 1,58E-04 | 7,83E-04 | 7,52E-09 | 8,05E-08 | 8,05E-08 | 6,35E-08 | 5,36E-07 | 6,79E-07 | 6,79E-07 | 5,36E-07 | 3,34E-07 | 4,52E-06 | 4,52E-06 | 3,57E-06 | 2,38E-05 |
| 0 | 2 | 1,32E-03 | 5,30E-05 | 1,07E-04 | 1,20E-04 | 1,20E-04 | 2,43E-04 | 6,35E-07 | 1,85E-06 | 2,04E-06 | 2,04E-06 | 4,42E-06 | 5,37E-06 | 5,92E-06 | 5,92E-06 | 5,37E-06 | 1,42E-05 | 1,56E-05 | 1,56E-05 | 3,74E-05 |
| 0 | 2 | 1,69E-03 | 1,04E-04 | 3,72E-04 | 2,58E-04 | 1,49E-04 | 5,35E-04 | 4,74E-07 | 2,68E-06 | 2,01E-06 | 1,30E-06 | 1,13E-05 | 9,81E-06 | 7,35E-06 | 4,77E-06 | 2,68E-06 | 3,11E-05 | 2,33E-05 | 1,51E-05 | 6,39E-05 |
| 0 | 2 | 6,88E-04 | 5,57E-05 | 9,86E-05 | 1,07E-04 | 1,07E-04 | 1,90E-04 | 1,53E-06 | 3,54E-06 | 3,79E-06 | 3,79E-06 | 7,11E-06 | 8,18E-06 | 8,77E-06 | 8,77E-06 | 8,18E-06 | 1,76E-05 | 1,89E-05 | 1,89E-05 | 3,80E-05 |
| 0 | 2 | 1,31E-03 | 3,00E-04 | 3,00E-04 | 7,83E-04 | 1,49E-03 | 1,49E-03 | 3,34E-07 | 1,09E-06 | 2,22E-06 | 3,57E-06 | 2,22E-06 | 5,73E-06 | 1,17E-05 | 1,88E-05 | 2,38E-05 | 2,38E-05 | 4,84E-05 | 7,77E-05 | 1,58E-04 |
| 0 | 2 | 6,96E-04 | 1,61E-04 | 3,49E-04 | 2,61E-04 | 1,77E-04 | 3,84E-04 | 7,21E-06 | 2,09E-05 | 1,63E-05 | 1,18E-05 | 5,13E-05 | 4,36E-05 | 3,41E-05 | 2,46E-05 | 1,63E-05 | 8,38E-05 | 6,55E-05 | 4,73E-05 | 1,16E-04 |
| 0 | 2 | 5,29E-04 | 7,83E-04 | 2,82E-03 | 1,49E-03 | 5,69E-04 | 2,05E-03 | 2,22E-06 | 1,88E-05 | 1,17E-05 | 5,73E-06 | 9,85E-05 | 7,77E-05 | 4,84E-05 | 2,38E-05 | 9,21E-06 | 2,54E-04 | 1,58E-04 | 7,77E-05 | 4,08E-04 |
| 0 | 2 | 2,08E-04 | 5,14E-03 | 8,10E-03 | 8,10E-03 | 5,14E-03 | 8,10E-03 | 6,43E-06 | 4,39E-05 | 4,39E-05 | 3,19E-05 | 1,58E-04 | 2,18E-04 | 2,18E-04 | 1,58E-04 | 8,33E-05 | 7,83E-04 | 7,83E-04 | 5,68E-04 | 2,05E-03 |
| 0 | 2 | 5,35E-04 | 1,14E-03 | 1,76E-03 | 1,32E-03 | 8,58E-04 | 1,32E-03 | 8,46E-05 | 2,16E-04 | 1,71E-04 | 1,20E-04 | 4,36E-04 | 3,88E-04 | 3,07E-04 | 2,16E-04 | 1,35E-04 | 6,19E-04 | 4,90E-04 | 3,45E-04 | 6,96E-04 |
| 0 | 2 | 1,34E-10 | 2,02E-05 | 9,74E-06 | 5,64E-06 | 2,72E-06 | 1,31E-06 | 7,42E-04 | 8,58E-04 | 5,56E-04 | 3,12E-04 | 7,42E-04 | 5,56E-04 | 3,61E-04 | 2,03E-04 | 9,86E-05 | 3,12E-04 | 2,03E-04 | 1,14E-04 | 9,86E-05 |
| 0 | 2 | 3,23E-11 | 1,68E-05 | 3,27E-06 | 3,92E-06 | 3,92E-06 | 7,61E-07 | 1,32E-03 | 7,42E-04 | 8,58E-04 | 8,58E-04 | 3,12E-04 | 4,17E-04 | 4,82E-04 | 4,82E-04 | 4,17E-04 | 2,03E-04 | 2,34E-04 | 2,34E-04 | 9,86E-05 |
| 0 | 2 | 1,58E-04 | 2,72E-03 | 1,69E-03 | 2,72E-03 | 3,45E-03 | 2,15E-03 | 1,49E-04 | 2,58E-04 | 3,72E-04 | 4,46E-04 | 3,10E-04 | 5,35E-04 | 7,70E-04 | 9,23E-04 | 9,23E-04 | 9,23E-04 | 1,33E-03 | 1,59E-03 | 1,91E-03 |
| 0 | 2 | 4,00E-10 | 5,69E-04 | 8,33E-05 | 1,58E-04 | 2,18E-04 | 3,19E-05 | 2,15E-03 | 1,69E-03 | 2,72E-03 | 3,45E-03 | 8,32E-04 | 1,69E-03 | 2,72E-03 | 3,45E-03 | 3,45E-03 | 1,34E-03 | 2,15E-03 | 2,72E-03 | 1,34E-03 |
| 0 | 5 | 3,42E-07 | 5,01E-09 | 8,49E-09 | 8,27E-09 | 7,96E-09 | 1,35E-08 | 4,99E-11 | 9,00E-11 | 8,80E-11 | 8,50E-11 | 1,59E-10 | 1,57E-10 | 1,53E-10 | 1,48E-10 | 1,42E-10 | 2,70E-10 | 2,64E-10 | 2,55E-10 | 4,50E-10 |
| 0 | 5 | 2,17E-06 | 3,61E-08 | 5,95E-08 | 5,87E-08 | 5,70E-08 | 9,38E-08 | 3,47E-10 | 6,18E-10 | 6,10E-10 | 5,95E-10 | 1,07E-09 | 1,07E-09 | 1,06E-09 | 1,03E-09 | 9,94E-10 | 1,84E-09 | 1,82E-09 | 1,77E-09 | 3,08E-09 |
| 0 | 5 | 2,31E-06 | 5,39E-08 | 8,56E-08 | 8,34E-08 | 8,03E-08 | 1,27E-07 | 7,59E-10 | 1,29E-09 | 1,26E-09 | 1,22E-09 | 2,15E-09 | 2,13E-09 | 2,08E-09 | 2,01E-09 | 1,92E-09 | 3,47E-09 | 3,39E-09 | 3,28E-09 | 5,46E-09 |
| 0 | 5 | 4,49E-06 | 9,38E-08 | 1,44E-07 | 1,48E-07 | 1,50E-07 | 2,30E-07 | 1,06E-09 | 1,77E-09 | 1,82E-09 | 1,84E-09 | 2,89E-09 | 3,00E-09 | 3,08E-09 | 3,12E-09 | 3,12E-09 | 5,01E-09 | 5,14E-09 | 5,21E-09 | 8,49E-09 |
| 0 | 5 | 8,34E-06 | 1,56E-07 | 2,60E-07 | 2,51E-07 | 2,39E-07 | 3,97E-07 | 1,41E-09 | 2,57E-09 | 2,49E-09 | 2,39E-09 | 4,56E-09 | 4,49E-09 | 4,36E-09 | 4,17E-09 | 3,93E-09 | 7,73E-09 | 7,51E-09 | 7,18E-09 | 1,27E-08 |
| 0 | 5 | 8,42E-06 | 2,23E-07 | 3,52E-07 | 3,42E-07 | 3,27E-07 | 5,15E-07 | 3,00E-09 | 5,14E-09 | 5,01E-09 | 4,82E-09 | 8,60E-09 | 8,49E-09 | 8,27E-09 | 7,96E-09 | 7,56E-09 | 1,38E-08 | 1,35E-08 | 1,30E-08 | 2,17E-08 |
| 0 | 5 | 6,35E-06 | 2,00E-07 | 2,97E-07 | 2,97E-07 | 2,94E-07 | 4,37E-07 | 3,51E-09 | 5,65E-09 | 5,65E-09 | 5,58E-09 | 8,89E-09 | 8,99E-09 | 8,99E-09 | 8,89E-09 | 8,69E-09 | 1,42E-08 | 1,42E-08 | 1,40E-08 | 2,20E-08 |
| 0 | 5 | 1,60E-05 | 5,39E-07 | 7,89E-07 | 8,01E-07 | 8,01E-07 | 1,17E-06 | 8,60E-09 | 1,38E-08 | 1,40E-08 | 1,40E-08 | 2,17E-08 | 2,22E-08 | 2,25E-08 | 2,25E-08 | 2,22E-08 | 2,22E-08 | 3,57E-08 | 3,57E-08 | 5,60E-08 |
| 0 | 5 | 6,04E-05 | 3,15E-06 | 4,34E-06 | 4,49E-06 | 4,57E-06 | 6,31E-06 | 5,87E-08 | 9,11E-08 | 9,38E-08 | 9,52E-08 | 1,37E-07 | 1,44E-07 | 1,48E-07 | 1,50E-07 | 1,50E-07 | 2,23E-07 | 2,30E-07 | 2,33E-07 | 3,52E-07 |
| 0 | 5 | 8,23E-05 | 4,01E-06 | 5,50E-06 | 5,84E-06 | 6,07E-06 | 8,34E-06 | 5,75E-08 | 9,09E-08 | 9,56E-08 | 9,89E-08 | 1,39E-07 | 1,49E-07 | 1,56E-07 | 1,62E-07 | 1,65E-07 | 2,39E-07 | 2,51E-07 | 2,60E-07 | 3,97E-07 |
| 0 | 5 | 8,46E-05 | 6,10E-06 | 8,71E-06 | 8,42E-06 | 8,00E-06 | 1,14E-05 | 1,44E-07 | 2,30E-07 | 2,23E-07 | 2,14E-07 | 3,57E-07 | 3,52E-07 | 3,42E-07 | 3,27E-07 | 3,08E-07 | 5,31E-07 | 5,15E-07 | 4,93E-07 | 7,66E-07 |
| 0 | 5 | 1,87E-04 | 2,96E-05 | 3,91E-05 | 3,83E-05 | 3,68E-05 | 4,86E-05 | 9,76E-07 | 1,49E-06 | 1,47E-06 | 1,42E-06 | 2,20E-06 | 2,20E-06 | 2,17E-06 | 2,09E-06 | 1,99E-06 | 3,20E-06 | 3,15E-06 | 3,04E-06 | 4,49E-06 |
| 0 | 5 | 1,53E-04 | 2,58E-05 | 3,38E-05 | 3,27E-05 | 3,11E-05 | 4,08E-05 | 1,12E-06 | 1,67E-06 | 1,62E-06 | 1,55E-06 | 2,41E-06 | 2,37E-06 | 2,31E-06 | 2,21E-06 | 2,08E-06 | 3,33E-06 | 3,23E-06 | 3,09E-06 | 4,46E-06 |
| 0 | 5 | 1,83E-04 | 5,26E-05 | 6,33E-05 | 6,33E-05 | 6,23E-05 | 7,51E-05 | 3,38E-06 | 4,67E-06 | 4,67E-06 | 4,60E-06 | 6,26E-06 | 6,35E-06 | 6,35E-06 | 6,26E-06 | 6,08E-06 | 8,52E-06 | 8,52E-06 | 8,40E-06 | 1,13E-05 |
| 0 | 5 | 2,09E-04 | 1,26E-04 | 1,41E-04 | 1,45E-04 | 1,45E-04 | 1,62E-04 | 8,85E-06 | 1,21E-05 | 1,24E-05 | 1,24E-05 | 1,60E-05 | 1,67E-05 | 1,70E-05 | 1,70E-05 | 1,67E-05 | 2,24E-05 | 2,29E-05 | 2,29E-05 | 3,02E-05 |
| 0 | 5 | 1,18E-17 | 1,18E-08 | 4,79E-09 | 4,38E-09 | 3,83E-09 | 1,56E-09 | 4,65E-05 | 3,39E-05 | 3,15E-05 | 2,84E-05 | 2,30E-05 | 2,22E-05 | 2,06E-05 | 1,86E-05 | 1,61E-05 | 1,40E-05 | 1,30E-05 | 1,17E-05 | 7,96E-06 |

| w, град. | u, м/с | C7 (t-2) | C3 (t-1) | C6 (t-1) | C7 (t-1) | C8 (t-1) | C11 (t-1) | C1 (t) | C2 (t) | C3 (t) | C4 (t) | C5 (t) | C6 (t) | C7 (t) | C8 (t) | C9 (t) | C10 (t) | C11 (t) | C12 (t) | C13 (t) |
|-------------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0 | 5 | 4,77E-15 | 4,75E-08 | 2,04E-08 | 2,11E-08 | 2,11E-08 | 9,04E-09 | 4,25E-05 | 2,94E-05 | 3,02E-05 | 3,02E-05 | 1,92E-05 | 2,03E-05 | 2,09E-05 | 2,09E-05 | 2,03E-05 | 2,03E-05 | 1,40E-05 | 1,40E-05 | 9,16E-06 |
| 0 | 5 | 7,15E-05 | 1,80E-04 | 1,83E-04 | 1,83E-04 | 1,80E-04 | 1,83E-04 | 4,29E-05 | 5,26E-05 | 5,26E-05 | 5,17E-05 | 6,23E-05 | 6,33E-05 | 6,33E-05 | 6,23E-05 | 6,02E-05 | 7,51E-05 | 7,51E-05 | 7,38E-05 | 8,74E-05 |
| 0 | 5 | 5,33E-06 | 1,35E-04 | 1,23E-04 | 1,17E-04 | 1,09E-04 | 9,93E-05 | 1,28E-04 | 1,47E-04 | 1,42E-04 | 1,33E-04 | 1,63E-04 | 1,59E-04 | 1,53E-04 | 1,44E-04 | 1,33E-04 | 1,69E-04 | 1,63E-04 | 1,53E-04 | 1,69E-04 |
| 0 | 5 | 1,57E-06 | 1,49E-04 | 1,25E-04 | 1,22E-04 | 1,15E-04 | 9,70E-05 | 1,59E-04 | 1,78E-04 | 1,74E-04 | 1,66E-04 | 1,91E-04 | 1,91E-04 | 1,87E-04 | 1,78E-04 | 1,66E-04 | 2,01E-04 | 1,96E-04 | 1,87E-04 | 2,01E-04 |
| 0 | 5 | 1,18E-08 | 4,65E-05 | 2,84E-05 | 3,15E-05 | 3,39E-05 | 2,06E-05 | 2,55E-04 | 2,34E-04 | 2,55E-04 | 2,70E-04 | 2,03E-04 | 2,28E-04 | 2,48E-04 | 2,63E-04 | 2,70E-04 | 2,15E-04 | 2,34E-04 | 2,48E-04 | 2,15E-04 |
| 90 | 0,5 | 3,65E-08 | 8,02E-10 | 1,64E-10 | 6,67E-09 | 1,60E-07 | 3,26E-08 | 1,78E-11 | 4,37E-12 | 1,84E-10 | 4,87E-09 | 4,21E-13 | 2,84E-11 | 1,20E-09 | 3,16E-08 | 5,23E-07 | 1,15E-10 | 4,87E-09 | 1,29E-07 | 1,24E-08 |
| 90 | 0,5 | 2,15E-07 | 2,47E-08 | 1,68E-09 | 3,46E-08 | 5,09E-07 | 3,46E-08 | 2,26E-09 | 1,98E-10 | 4,16E-09 | 6,44E-08 | 9,45E-12 | 2,69E-10 | 5,64E-09 | 8,73E-08 | 9,96E-07 | 2,69E-10 | 5,64E-09 | 8,73E-08 | 4,16E-09 |
| 90 | 0,5 | 2,39E-06 | 1,28E-08 | 4,55E-10 | 1,18E-07 | 1,01E-05 | 3,60E-07 | 5,51E-11 | 3,28E-12 | 9,24E-10 | 1,02E-07 | 2,98E-14 | 2,15E-11 | 6,05E-09 | 6,65E-07 | 2,86E-05 | 5,51E-11 | 1,55E-08 | 1,70E-06 | 1,55E-08 |
| 90 | 0,5 | 1,01E-07 | 4,41E-08 | 2,19E-09 | 2,67E-08 | 2,54E-07 | 1,26E-08 | 1,45E-08 | 9,39E-10 | 1,16E-08 | 1,13E-07 | 3,85E-11 | 5,95E-10 | 7,32E-09 | 7,18E-08 | 5,60E-07 | 3,00E-10 | 3,69E-09 | 3,62E-08 | 1,48E-09 |
| 90 | 0,5 | 2,33E-06 | 3,74E-07 | 2,88E-09 | 1,87E-07 | 6,04E-06 | 4,65E-08 | 3,65E-08 | 5,33E-10 | 3,65E-08 | 1,37E-06 | 2,32E-12 | 2,91E-10 | 2,00E-08 | 7,47E-07 | 1,53E-05 | 8,71E-11 | 5,97E-09 | 2,23E-07 | 9,75E-10 |
| 90 | 0,5 | 3,37E-06 | 3,99E-07 | 1,01E-07 | 9,10E-07 | 6,26E-06 | 1,58E-06 | 4,41E-08 | 1,26E-08 | 1,20E-07 | 8,86E-07 | 2,19E-09 | 2,67E-08 | 2,54E-07 | 1,88E-06 | 1,08E-05 | 4,41E-08 | 4,18E-07 | 3,09E-06 | 5,37E-07 |
| 90 | 0,5 | 1,01E-05 | 1,02E-07 | 2,60E-07 | 4,36E-06 | 2,86E-05 | 7,32E-05 | 7,47E-10 | 1,67E-09 | 4,18E-08 | 4,67E-07 | 7,47E-10 | 4,18E-08 | 1,04E-06 | 1,17E-05 | 5,83E-05 | 4,67E-07 | 1,17E-05 | 1,30E-04 | 5,83E-05 |
| 90 | 0,5 | 3,47E-12 | 7,59E-12 | 2,03E-07 | 2,64E-08 | 4,48E-10 | 1,20E-05 | 6,47E-13 | 1,13E-08 | 2,33E-09 | 4,54E-10 | 1,65E-07 | 2,39E-06 | 1,64E-06 | 3,18E-07 | 1,20E-08 | 1,32E-04 | 2,23E-04 | 4,33E-05 | 7,29E-03 |
| 90 | 0,5 | 6,57E-02 | 5,93E-04 | 4,89E-08 | 5,93E-04 | 6,53E-02 | 5,38E-06 | 5,98E-08 | 6,21E-11 | 1,86E-06 | 1,79E-03 | 6,68E-17 | 6,21E-11 | 1,86E-06 | 1,79E-03 | 5,56E-02 | 2,00E-12 | 5,98E-08 | 5,77E-05 | 6,21E-11 |
| 90 | 0,5 | 3,81E-05 | 1,89E-05 | 9,57E-07 | 8,98E-06 | 5,79E-05 | 2,93E-06 | 5,35E-06 | 3,64E-07 | 3,82E-06 | 2,87E-05 | 1,26E-08 | 1,86E-07 | 1,95E-06 | 1,47E-05 | 7,87E-05 | 6,78E-08 | 7,12E-07 | 5,35E-06 | 1,86E-07 |
| 90 | 0,5 | 7,05E-04 | 1,64E-06 | 3,18E-07 | 4,33E-05 | 1,15E-03 | 2,23E-04 | 2,98E-09 | 7,81E-10 | 1,65E-07 | 9,09E-06 | 1,41E-11 | 1,13E-08 | 2,39E-06 | 1,32E-04 | 1,91E-03 | 4,32E-08 | 9,09E-06 | 5,03E-04 | 9,09E-06 |
| 90 | 0,5 | 4,32E-34 | 1,57E-19 | 8,78E-08 | 1,17E-13 | 1,81E-22 | 1,02E-10 | 3,32E-16 | 4,89E-08 | 4,44E-10 | 3,66E-14 | 5,93E-04 | 5,93E-04 | 5,38E-06 | 4,44E-10 | 3,32E-16 | 6,53E-02 | 5,93E-04 | 4,89E-08 | 5,93E-04 |
| 90 | 0,5 | 7,46E-05 | 2,29E-05 | 3,97E-06 | 2,29E-05 | 1,03E-04 | 1,78E-05 | 5,48E-06 | 1,11E-06 | 6,89E-06 | 3,40E-05 | 1,42E-07 | 1,11E-06 | 6,89E-06 | 3,40E-05 | 1,34E-04 | 8,83E-07 | 5,48E-06 | 2,71E-05 | 3,47E-06 |
| 90 | 0,5 | 1,35E-04 | 3,52E-05 | 1,35E-05 | 5,17E-05 | 1,64E-04 | 6,27E-05 | 7,87E-06 | 3,24E-06 | 1,34E-05 | 4,64E-05 | 9,37E-07 | 4,62E-06 | 1,91E-05 | 6,61E-05 | 1,92E-04 | 5,52E-06 | 2,28E-05 | 7,89E-05 | 2,28E-05 |
| 90 | 0,5 | 1,38E-09 | 1,70E-06 | 7,32E-05 | 1,70E-06 | 1,55E-08 | 6,65E-07 | 5,83E-05 | 1,46E-03 | 1,30E-04 | 5,22E-06 | 7,29E-03 | 1,46E-03 | 1,30E-04 | 5,22E-06 | 9,34E-08 | 6,52E-04 | 5,83E-05 | 2,33E-06 | 1,17E-05 |
| 90 | 0,5 | 1,29E-03 | 1,43E-04 | 1,43E-04 | 5,84E-04 | 1,49E-03 | 1,49E-03 | 1,09E-05 | 1,09E-05 | 5,78E-05 | 2,02E-04 | 4,75E-06 | 3,81E-05 | 2,02E-04 | 7,03E-04 | 1,62E-03 | 8,76E-05 | 4,63E-04 | 1,62E-03 | 7,03E-04 |
| 90 | 0,5 | 2,57E-13 | 2,64E-08 | 9,18E-05 | 2,03E-07 | 5,83E-11 | 2,03E-07 | 1,64E-06 | 1,15E-03 | 4,33E-05 | 3,18E-07 | 3,03E-02 | 5,89E-03 | 2,23E-04 | 1,64E-06 | 2,33E-09 | 5,89E-03 | 2,23E-04 | 1,64E-06 | 4,33E-05 |
| 90 | 0,5 | 2,41E-03 | 8,27E-04 | 2,16E-04 | 8,27E-04 | 2,27E-03 | 5,91E-04 | 1,76E-04 | 5,21E-05 | 2,39E-04 | 8,06E-04 | 8,39E-06 | 5,21E-05 | 2,39E-04 | 8,06E-04 | 2,01E-03 | 3,84E-05 | 1,76E-04 | 5,95E-04 | 9,57E-05 |
| 90 | 0,5 | 1,87E-07 | 4,57E-06 | 1,71E-04 | 1,53E-05 | 7,47E-07 | 2,80E-05 | 1,87E-05 | 4,48E-04 | 9,15E-05 | 1,10E-05 | 3,72E-03 | 1,29E-03 | 2,64E-04 | 3,18E-05 | 2,25E-06 | 2,19E-03 | 4,48E-04 | 5,39E-05 | 4,48E-04 |
| 90 | 0,5 | 1,46E-03 | 6,32E-03 | 7,85E-04 | 1,57E-03 | 1,57E-03 | 1,95E-04 | 6,42E-03 | 1,05E-03 | 3,51E-03 | 6,42E-03 | 5,12E-05 | 3,13E-04 | 1,05E-03 | 1,92E-03 | 1,92E-03 | 5,12E-05 | 1,71E-04 | 3,13E-04 | 1,53E-05 |
| 90 | 0,5 | 4,44E-03 | 1,48E-03 | 1,48E-03 | 2,72E-03 | 3,69E-03 | 3,69E-03 | 3,89E-04 | 3,89E-04 | 8,89E-04 | 1,54E-03 | 2,24E-04 | 6,75E-04 | 1,54E-03 | 2,67E-03 | 3,52E-03 | 8,89E-04 | 2,03E-03 | 3,52E-03 | 2,03E-03 |
| 90 | 0,5 | 7,32E-05 | 5,83E-05 | 1,46E-03 | 6,52E-04 | 1,30E-04 | 3,26E-03 | 1,21E-05 | 1,95E-04 | 1,95E-04 | 9,75E-05 | 7,85E-04 | 1,57E-03 | 1,57E-03 | 7,85E-04 | 1,95E-04 | 6,32E-03 | 6,32E-03 | 3,15E-03 | 1,27E-02 |
| 90 | 0,5 | 1,49E-03 | 1,62E-03 | 5,63E-03 | 3,72E-03 | 1,62E-03 | 5,63E-03 | 7,89E-04 | 2,41E-03 | 2,41E-03 | 1,66E-03 | 3,51E-03 | 5,09E-03 | 5,09E-03 | 3,51E-03 | 1,66E-03 | 7,39E-03 | 7,39E-03 | 5,09E-03 | 7,39E-03 |
| 90 | 0,5 | 5,98E-08 | 3,80E-03 | 3,80E-03 | 2,81E-04 | 1,55E-06 | 1,55E-06 | 4,16E-02 | 4,16E-02 | 4,16E-02 | 5,41E-03 | 7,05E-04 | 5,41E-03 | 5,41E-03 | 7,05E-04 | 1,20E-05 | 9,18E-05 | 9,18E-05 | 1,20E-05 | 2,03E-07 |

| w, град. | u, м/с | C7 (t-2) | C3 (t-1) | C6 (t-1) | C7 (t-1) | C8 (t-1) | C11 (t-1) | C1 (t) | C2 (t) | C3 (t) | C4 (t) | C5 (t) | C6 (t) | C7 (t) | C8 (t) | C9 (t) | C10 (t) | C11 (t) | C12 (t) | C13 (t) |
|----------|--------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 90 | 0,5 | 2,81E-04 | 4,16E-02 | 5,41E-03 | 5,41E-03 | 7,05E-04 | 9,18E-05 | 3,03E-02 | 5,89E-03 | 3,03E-02 | 3,03E-02 | 4,33E-05 | 1,15E-03 | 5,89E-03 | 5,89E-03 | 1,15E-03 | 4,33E-05 | 2,23E-04 | 2,23E-04 | 1,64E-06 |
| 90 | 0,5 | 7,29E-03 | 8,04E-03 | 2,45E-02 | 2,45E-02 | 8,04E-03 | 2,45E-02 | 1,23E-03 | 3,14E-03 | 8,04E-03 | 8,04E-03 | 1,23E-03 | 8,04E-03 | 2,06E-02 | 2,06E-02 | 8,04E-03 | 8,04E-03 | 2,06E-02 | 2,06E-02 | 8,04E-03 |
| 90 | 0,5 | 1,31E-10 | 4,84E-02 | 4,84E-02 | 4,84E-02 | 1,28E-06 | 1,28E-06 | 7,60E-05 | 7,60E-05 | 6,57E-02 | 6,57E-02 | 1,02E-10 | 7,60E-05 | 6,57E-02 | 6,57E-02 | 7,60E-05 | 8,78E-08 | 7,60E-05 | 7,60E-05 | 1,02E-10 |
| 90 | 1 | 2,04E-08 | 2,82E-09 | 3,26E-10 | 2,19E-09 | 1,29E-08 | 1,50E-09 | 3,49E-10 | 4,53E-11 | 3,11E-10 | 1,91E-09 | 4,69E-12 | 3,61E-11 | 2,48E-10 | 1,52E-09 | 8,34E-09 | 2,57E-11 | 1,77E-10 | 1,08E-09 | 1,12E-10 |
| 90 | 1 | 9,31E-09 | 1,38E-09 | 4,09E-10 | 1,74E-09 | 6,82E-09 | 2,02E-09 | 2,13E-10 | 6,56E-11 | 2,82E-10 | 1,13E-09 | 1,76E-11 | 8,08E-11 | 3,47E-10 | 1,39E-09 | 5,20E-09 | 9,28E-11 | 3,99E-10 | 1,60E-09 | 4,27E-10 |
| 90 | 1 | 9,51E-08 | 6,47E-09 | 9,22E-10 | 7,62E-09 | 5,35E-08 | 7,62E-09 | 4,29E-10 | 6,68E-11 | 5,71E-10 | 4,23E-09 | 7,81E-12 | 7,70E-11 | 6,59E-10 | 4,88E-09 | 3,13E-08 | 7,70E-11 | 6,59E-10 | 4,88E-09 | 5,71E-10 |
| 90 | 1 | 5,74E-08 | 7,36E-09 | 1,44E-09 | 7,36E-09 | 3,39E-08 | 6,64E-09 | 8,82E-10 | 1,84E-10 | 9,68E-10 | 4,63E-09 | 3,20E-11 | 1,84E-10 | 9,68E-10 | 4,63E-09 | 2,02E-08 | 1,68E-10 | 8,82E-10 | 4,22E-09 | 7,34E-10 |
| 90 | 1 | 1,14E-07 | 8,85E-09 | 2,19E-09 | 1,29E-08 | 6,74E-08 | 1,67E-08 | 6,88E-10 | 1,77E-10 | 1,08E-09 | 5,94E-09 | 3,61E-11 | 2,48E-10 | 1,52E-09 | 8,34E-09 | 4,08E-08 | 3,11E-10 | 1,91E-09 | 1,05E-08 | 2,14E-09 |
| 90 | 1 | 1,96E-07 | 2,72E-08 | 3,18E-09 | 2,04E-08 | 1,14E-07 | 1,33E-08 | 3,20E-09 | 4,20E-10 | 2,82E-09 | 1,67E-08 | 4,28E-11 | 3,26E-10 | 2,19E-09 | 1,29E-08 | 6,74E-08 | 2,23E-10 | 1,50E-09 | 8,85E-09 | 9,01E-10 |
| 90 | 1 | 1,63E-06 | 2,92E-07 | 7,34E-08 | 2,67E-07 | 8,83E-07 | 2,22E-07 | 4,56E-08 | 1,20E-08 | 4,56E-08 | 1,60E-07 | 2,66E-09 | 1,10E-08 | 4,20E-08 | 1,47E-07 | 4,74E-07 | 9,31E-09 | 3,55E-08 | 1,24E-07 | 2,76E-08 |
| 90 | 1 | 6,54E-06 | 3,37E-07 | 7,90E-08 | 4,89E-07 | 2,61E-06 | 5,89E-07 | 1,95E-08 | 4,51E-09 | 3,17E-08 | 1,89E-07 | 7,84E-10 | 6,47E-09 | 4,39E-08 | 2,62E-07 | 1,33E-06 | 7,62E-09 | 5,16E-08 | 3,08E-07 | 5,16E-08 |
| 90 | 1 | 2,56E-05 | 3,52E-06 | 8,41E-07 | 3,52E-06 | 1,27E-05 | 3,05E-06 | 3,99E-07 | 9,87E-08 | 4,53E-07 | 1,83E-06 | 1,90E-08 | 9,87E-08 | 4,53E-07 | 1,83E-06 | 6,51E-06 | 8,69E-08 | 3,99E-07 | 1,61E-06 | 3,09E-07 |
| 90 | 1 | 7,19E-05 | 4,73E-06 | 1,87E-06 | 8,27E-06 | 3,04E-05 | 1,20E-05 | 3,19E-07 | 1,21E-07 | 6,12E-07 | 2,64E-06 | 3,29E-08 | 1,96E-07 | 9,96E-07 | 4,30E-06 | 1,58E-05 | 2,72E-07 | 1,38E-06 | 5,94E-06 | 1,62E-06 |
| 90 | 1 | 2,79E-04 | 1,80E-05 | 4,01E-06 | 2,31E-05 | 1,03E-04 | 2,31E-05 | 7,95E-07 | 1,77E-07 | 1,22E-06 | 6,79E-06 | 2,57E-08 | 2,20E-07 | 1,51E-06 | 8,42E-06 | 3,78E-05 | 2,20E-07 | 1,51E-06 | 8,42E-06 | 1,22E-06 |
| 90 | 1 | 4,96E-05 | 1,06E-05 | 3,04E-06 | 9,44E-06 | 2,62E-05 | 7,53E-06 | 1,81E-06 | 5,32E-07 | 1,81E-06 | 5,55E-06 | 1,28E-07 | 4,80E-07 | 1,63E-06 | 5,01E-06 | 1,39E-05 | 3,92E-07 | 1,33E-06 | 4,09E-06 | 9,81E-07 |
| 90 | 1 | 1,95E-03 | 1,83E-04 | 3,14E-05 | 1,83E-04 | 7,49E-04 | 1,29E-04 | 8,15E-06 | 1,39E-06 | 1,09E-05 | 6,40E-05 | 1,32E-07 | 1,39E-06 | 1,09E-05 | 6,40E-05 | 2,79E-04 | 1,04E-06 | 8,15E-06 | 4,77E-05 | 4,52E-06 |
| 90 | 1 | 1,84E-03 | 8,65E-05 | 8,65E-05 | 4,27E-04 | 1,24E-03 | 1,24E-03 | 1,32E-06 | 8,61E-07 | 7,36E-06 | 4,10E-05 | 2,38E-07 | 3,12E-06 | 2,67E-05 | 1,48E-04 | 5,38E-04 | 7,36E-06 | 6,29E-05 | 3,50E-04 | 9,66E-05 |
| 90 | 1 | 7,77E-04 | 2,57E-04 | 9,45E-05 | 2,23E-04 | 4,56E-04 | 1,67E-04 | 5,63E-05 | 2,04E-05 | 5,63E-05 | 1,37E-04 | 5,73E-06 | 1,80E-05 | 4,96E-05 | 1,21E-04 | 2,58E-04 | 1,39E-05 | 3,85E-05 | 9,36E-05 | 2,63E-05 |
| 90 | 1 | 1,87E-14 | 2,79E-07 | 2,12E-06 | 7,21E-08 | 1,25E-09 | 9,48E-09 | 4,27E-04 | 1,24E-03 | 2,51E-04 | 2,98E-05 | 1,24E-03 | 4,27E-04 | 8,65E-05 | 1,03E-05 | 7,20E-07 | 8,65E-05 | 1,75E-05 | 2,09E-06 | 2,09E-06 |
| 90 | 1 | 1,18E-08 | 3,79E-06 | 6,36E-05 | 1,09E-05 | 1,32E-06 | 2,21E-05 | 4,77E-05 | 3,75E-04 | 1,55E-04 | 4,77E-05 | 1,63E-03 | 9,06E-04 | 3,75E-04 | 1,15E-04 | 2,65E-05 | 1,63E-03 | 6,75E-04 | 2,08E-04 | 9,06E-04 |
| 90 | 1 | 1,04E-15 | 1,27E-08 | 1,81E-05 | 4,80E-07 | 3,79E-09 | 5,41E-06 | 9,78E-07 | 8,32E-05 | 3,42E-05 | 5,78E-06 | 1,20E-03 | 1,20E-03 | 4,92E-04 | 8,32E-05 | 5,78E-06 | 7,07E-03 | 2,91E-03 | 4,92E-04 | 7,07E-03 |
| 90 | 1 | 1,81E-05 | 7,07E-03 | 1,20E-03 | 1,20E-03 | 4,92E-04 | 8,32E-05 | 7,12E-03 | 9,35E-04 | 3,62E-03 | 7,12E-03 | 3,18E-05 | 2,42E-04 | 9,35E-04 | 1,84E-03 | 1,84E-03 | 3,18E-05 | 1,23E-04 | 2,42E-04 | 8,21E-06 |
| 90 | 1 | 5,38E-04 | 7,49E-04 | 2,16E-03 | 2,16E-03 | 1,52E-03 | 4,36E-03 | 2,08E-04 | 3,75E-04 | 6,75E-04 | 9,06E-04 | 3,75E-04 | 9,06E-04 | 1,63E-03 | 2,19E-03 | 2,19E-03 | 1,63E-03 | 2,94E-03 | 3,95E-03 | 3,95E-03 |
| 90 | 1 | 3,75E-04 | 7,61E-04 | 2,07E-03 | 1,61E-03 | 9,77E-04 | 2,65E-03 | 4,00E-04 | 7,61E-04 | 9,44E-04 | 9,44E-04 | 9,44E-04 | 1,45E-03 | 1,80E-03 | 1,80E-03 | 1,45E-03 | 2,23E-03 | 2,76E-03 | 2,76E-03 | 3,42E-03 |
| 90 | 1 | 1,46E-07 | 9,66E-05 | 5,38E-04 | 9,66E-05 | 1,13E-05 | 6,29E-05 | 1,52E-03 | 4,36E-03 | 2,16E-03 | 7,49E-04 | 6,20E-03 | 4,36E-03 | 2,16E-03 | 7,49E-04 | 1,83E-04 | 3,07E-03 | 1,52E-03 | 5,27E-04 | 7,49E-04 |
| 90 | 1 | 7,79E-06 | 4,06E-04 | 3,58E-03 | 1,18E-03 | 2,38E-04 | 2,00E-03 | 5,13E-04 | 1,86E-03 | 1,86E-03 | 1,21E-03 | 2,99E-03 | 4,60E-03 | 4,39E-03 | 2,86E-03 | 1,21E-03 | 7,06E-03 | 6,74E-03 | 4,39E-03 | 6,74E-03 |
| 90 | 1 | 2,80E-08 | 1,23E-04 | 1,84E-03 | 2,42E-04 | 1,62E-05 | 2,42E-04 | 1,24E-03 | 6,10E-03 | 3,58E-03 | 1,24E-03 | 1,04E-02 | 1,04E-02 | 6,10E-03 | 2,11E-03 | 4,27E-04 | 1,04E-02 | 6,10E-03 | 2,11E-03 | 3,58E-03 |
| 90 | 2 | 5,50E-07 | 1,08E-08 | 2,07E-09 | 9,78E-09 | 4,19E-08 | 8,05E-09 | 1,90E-10 | 3,69E-11 | 1,90E-10 | 8,96E-10 | 6,12E-12 | 3,40E-11 | 1,75E-10 | 8,26E-10 | 3,60E-09 | 2,89E-11 | 1,48E-10 | 7,01E-10 | 1,16E-10 |
| 90 | 2 | 1,68E-05 | 1,50E-07 | 2,65E-08 | 1,50E-07 | 7,31E-07 | 1,30E-07 | 9,87E-10 | 1,70E-10 | 1,11E-09 | 6,43E-09 | 2,33E-11 | 1,70E-10 | 1,11E-09 | 6,43E-09 | 3,31E-08 | 1,52E-10 | 9,87E-10 | 5,72E-09 | 7,81E-10 |

| w, град. | u, м/с | C7 (t-2) | C3 (t-1) | C6 (t-1) | C7 (t-1) | C8 (t-1) | C11 (t-1) | C1 (t) | C2 (t) | C3 (t) | C4 (t) | C5 (t) | C6 (t) | C7 (t) | C8 (t) | C9 (t) | C10 (t) | C11 (t) | C12 (t) | C13 (t) |
|----------|--------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 90 | 2 | 2,18E-04 | 5,36E-07 | 8,05E-08 | 6,79E-07 | 4,52E-06 | 6,79E-07 | 1,08E-09 | 1,46E-10 | 1,56E-09 | 1,39E-08 | 1,37E-11 | 1,76E-10 | 1,87E-09 | 1,66E-08 | 1,23E-07 | 1,76E-10 | 1,87E-09 | 1,66E-08 | 1,56E-09 |
| 90 | 2 | 2,80E-05 | 1,10E-06 | 4,86E-07 | 1,41E-06 | 3,75E-06 | 1,65E-06 | 3,29E-08 | 1,33E-08 | 4,35E-08 | 1,33E-07 | 4,67E-09 | 1,64E-08 | 5,37E-08 | 1,64E-07 | 4,67E-07 | 1,88E-08 | 6,17E-08 | 1,89E-07 | 6,62E-08 |
| 90 | 2 | 7,83E-04 | 1,88E-05 | 2,22E-06 | 1,17E-05 | 4,84E-05 | 5,73E-06 | 1,23E-07 | 1,39E-08 | 1,03E-07 | 6,35E-07 | 1,08E-09 | 9,64E-09 | 7,14E-08 | 4,41E-07 | 2,27E-06 | 5,58E-09 | 4,14E-08 | 2,55E-07 | 2,00E-08 |
| 90 | 2 | 8,10E-03 | 1,58E-04 | 4,39E-05 | 2,18E-04 | 7,83E-04 | 2,18E-04 | 3,34E-07 | 6,35E-08 | 5,36E-07 | 3,57E-06 | 7,52E-09 | 8,05E-08 | 6,79E-07 | 4,52E-06 | 2,38E-05 | 8,05E-08 | 6,79E-07 | 4,52E-06 | 5,36E-07 |
| 90 | 2 | 1,32E-03 | 1,20E-04 | 5,30E-05 | 1,20E-04 | 2,43E-04 | 1,07E-04 | 5,37E-06 | 2,04E-06 | 5,92E-06 | 1,56E-05 | 6,35E-07 | 2,04E-06 | 5,92E-06 | 1,56E-05 | 3,74E-05 | 1,85E-06 | 5,37E-06 | 1,42E-05 | 4,42E-06 |
| 90 | 2 | 1,69E-03 | 1,49E-04 | 1,04E-04 | 2,58E-04 | 5,35E-04 | 3,72E-04 | 2,68E-06 | 1,30E-06 | 4,77E-06 | 1,51E-05 | 4,74E-07 | 2,01E-06 | 7,35E-06 | 2,33E-05 | 6,39E-05 | 2,68E-06 | 9,81E-06 | 3,11E-05 | 1,13E-05 |
| 90 | 2 | 6,88E-04 | 1,07E-04 | 5,57E-05 | 1,07E-04 | 1,90E-04 | 9,86E-05 | 8,18E-06 | 3,79E-06 | 8,77E-06 | 1,89E-05 | 1,53E-06 | 3,79E-06 | 8,77E-06 | 1,89E-05 | 3,80E-05 | 3,54E-06 | 8,18E-06 | 1,76E-05 | 7,11E-06 |
| 90 | 2 | 1,31E-03 | 1,49E-03 | 3,00E-04 | 7,83E-04 | 1,49E-03 | 3,00E-04 | 2,38E-05 | 3,57E-06 | 1,88E-05 | 7,77E-05 | 3,34E-07 | 2,22E-06 | 1,17E-05 | 4,84E-05 | 1,58E-04 | 1,09E-06 | 5,73E-06 | 2,38E-05 | 2,22E-06 |
| 90 | 2 | 6,96E-04 | 1,77E-04 | 1,61E-04 | 2,61E-04 | 3,84E-04 | 3,49E-04 | 1,63E-05 | 1,18E-05 | 2,46E-05 | 4,73E-05 | 7,21E-06 | 1,63E-05 | 3,41E-05 | 6,55E-05 | 1,16E-04 | 2,09E-05 | 4,36E-05 | 8,38E-05 | 5,13E-05 |
| 90 | 2 | 5,29E-04 | 5,69E-04 | 7,83E-04 | 1,49E-03 | 2,05E-03 | 2,82E-03 | 9,21E-06 | 5,73E-06 | 2,38E-05 | 7,77E-05 | 2,22E-06 | 1,17E-05 | 4,84E-05 | 1,58E-04 | 4,08E-04 | 1,88E-05 | 7,77E-05 | 2,54E-04 | 9,85E-05 |
| 90 | 2 | 2,08E-04 | 5,14E-03 | 5,14E-03 | 8,10E-03 | 8,10E-03 | 8,10E-03 | 8,33E-05 | 3,19E-05 | 1,58E-04 | 5,68E-04 | 6,43E-06 | 4,39E-05 | 2,18E-04 | 7,83E-04 | 2,05E-03 | 4,39E-05 | 2,18E-04 | 7,83E-04 | 1,58E-04 |
| 90 | 2 | 5,35E-04 | 8,58E-04 | 1,14E-03 | 1,32E-03 | 1,32E-03 | 1,76E-03 | 1,35E-04 | 1,20E-04 | 2,16E-04 | 3,45E-04 | 8,46E-05 | 1,71E-04 | 3,07E-04 | 4,90E-04 | 6,96E-04 | 2,16E-04 | 3,88E-04 | 6,19E-04 | 4,36E-04 |
| 90 | 2 | 1,34E-10 | 2,72E-06 | 2,02E-05 | 5,64E-06 | 1,31E-06 | 9,74E-06 | 9,86E-05 | 3,12E-04 | 2,03E-04 | 1,14E-04 | 7,42E-04 | 5,56E-04 | 3,61E-04 | 2,03E-04 | 9,86E-05 | 8,58E-04 | 5,56E-04 | 3,12E-04 | 7,42E-04 |
| 90 | 2 | 3,23E-11 | 3,92E-06 | 1,68E-05 | 3,92E-06 | 7,61E-07 | 3,27E-06 | 4,17E-04 | 8,58E-04 | 4,82E-04 | 2,34E-04 | 1,32E-03 | 8,58E-04 | 4,82E-04 | 2,34E-04 | 9,86E-05 | 7,42E-04 | 4,17E-04 | 2,03E-04 | 3,12E-04 |
| 90 | 2 | 1,58E-04 | 3,45E-03 | 2,72E-03 | 2,72E-03 | 2,15E-03 | 1,69E-03 | 9,23E-04 | 4,46E-04 | 9,23E-04 | 1,59E-03 | 1,49E-04 | 3,72E-04 | 7,70E-04 | 1,33E-03 | 1,91E-03 | 2,58E-04 | 5,35E-04 | 9,23E-04 | 3,10E-04 |
| 90 | 2 | 4,00E-10 | 2,18E-04 | 5,69E-04 | 1,58E-04 | 3,19E-05 | 8,33E-05 | 3,45E-03 | 3,45E-03 | 3,45E-03 | 2,72E-03 | 2,15E-03 | 2,72E-03 | 2,72E-03 | 2,15E-03 | 1,34E-03 | 1,69E-03 | 1,69E-03 | 1,34E-03 | 8,32E-04 |
| 90 | 5 | 3,42E-07 | 7,96E-09 | 5,01E-09 | 8,27E-09 | 1,35E-08 | 8,49E-09 | 1,42E-10 | 8,50E-11 | 1,48E-10 | 2,55E-10 | 4,99E-11 | 8,80E-11 | 1,53E-10 | 2,64E-10 | 4,50E-10 | 9,00E-11 | 1,57E-10 | 2,70E-10 | 1,59E-10 |
| 90 | 5 | 2,17E-06 | 5,70E-08 | 3,61E-08 | 5,87E-08 | 9,38E-08 | 5,95E-08 | 9,94E-10 | 5,95E-10 | 1,03E-09 | 1,77E-09 | 3,47E-10 | 6,10E-10 | 1,06E-09 | 1,82E-09 | 3,08E-09 | 6,18E-10 | 1,07E-09 | 1,84E-09 | 1,07E-09 |
| 90 | 5 | 2,31E-06 | 8,03E-08 | 5,39E-08 | 8,34E-08 | 1,27E-07 | 8,56E-08 | 1,92E-09 | 1,22E-09 | 2,01E-09 | 3,28E-09 | 7,59E-10 | 1,26E-09 | 2,08E-09 | 3,39E-09 | 5,46E-09 | 1,29E-09 | 2,13E-09 | 3,47E-09 | 2,15E-09 |
| 90 | 5 | 4,49E-06 | 1,50E-07 | 9,38E-08 | 1,48E-07 | 2,30E-07 | 1,44E-07 | 3,12E-09 | 1,84E-09 | 3,12E-09 | 5,21E-09 | 1,06E-09 | 1,82E-09 | 3,08E-09 | 5,14E-09 | 8,49E-09 | 1,77E-09 | 3,00E-09 | 5,01E-09 | 2,89E-09 |
| 90 | 5 | 8,34E-06 | 2,39E-07 | 1,56E-07 | 2,51E-07 | 3,97E-07 | 2,60E-07 | 3,93E-09 | 2,39E-09 | 4,17E-09 | 7,18E-09 | 1,41E-09 | 2,49E-09 | 4,36E-09 | 7,51E-09 | 1,27E-08 | 2,57E-09 | 4,49E-09 | 7,73E-09 | 4,56E-09 |
| 90 | 5 | 8,42E-06 | 3,27E-07 | 2,23E-07 | 3,42E-07 | 5,15E-07 | 3,52E-07 | 7,56E-09 | 4,82E-09 | 7,96E-09 | 1,30E-08 | 3,00E-09 | 5,01E-09 | 8,27E-09 | 1,35E-08 | 2,17E-08 | 5,14E-09 | 8,49E-09 | 1,38E-08 | 8,60E-09 |
| 90 | 5 | 6,35E-06 | 2,94E-07 | 2,00E-07 | 2,97E-07 | 4,37E-07 | 2,97E-07 | 8,69E-09 | 5,58E-09 | 8,89E-09 | 1,40E-08 | 3,51E-09 | 5,65E-09 | 8,99E-09 | 1,42E-08 | 2,20E-08 | 5,65E-09 | 8,99E-09 | 1,42E-08 | 8,89E-09 |
| 90 | 5 | 1,60E-05 | 8,01E-07 | 5,39E-07 | 8,01E-07 | 1,17E-06 | 7,89E-07 | 2,22E-08 | 1,40E-08 | 2,25E-08 | 3,57E-08 | 8,60E-09 | 1,40E-08 | 2,25E-08 | 3,57E-08 | 5,60E-08 | 1,38E-08 | 2,22E-08 | 2,22E-08 | 2,17E-08 |
| 90 | 5 | 6,04E-05 | 4,57E-06 | 3,15E-06 | 4,49E-06 | 6,31E-06 | 4,34E-06 | 1,50E-07 | 9,52E-08 | 1,50E-07 | 2,33E-07 | 5,87E-08 | 9,38E-08 | 1,48E-07 | 2,30E-07 | 3,52E-07 | 9,11E-08 | 1,44E-07 | 2,23E-07 | 1,37E-07 |
| 90 | 5 | 8,23E-05 | 6,07E-06 | 4,01E-06 | 5,84E-06 | 8,34E-06 | 5,50E-06 | 1,65E-07 | 9,89E-08 | 1,62E-07 | 2,60E-07 | 5,75E-08 | 9,56E-08 | 1,56E-07 | 2,51E-07 | 3,97E-07 | 9,09E-08 | 1,49E-07 | 2,39E-07 | 1,39E-07 |
| 90 | 5 | 8,46E-05 | 8,00E-06 | 6,10E-06 | 8,42E-06 | 1,14E-05 | 8,71E-06 | 3,08E-07 | 2,14E-07 | 3,27E-07 | 4,93E-07 | 1,44E-07 | 2,23E-07 | 3,42E-07 | 5,15E-07 | 7,66E-07 | 2,30E-07 | 3,52E-07 | 5,31E-07 | 3,57E-07 |
| 90 | 5 | 1,87E-04 | 3,68E-05 | 2,96E-05 | 3,83E-05 | 4,86E-05 | 3,91E-05 | 1,99E-06 | 1,42E-06 | 2,09E-06 | 3,04E-06 | 9,76E-07 | 1,47E-06 | 2,17E-06 | 3,15E-06 | 4,49E-06 | 1,49E-06 | 2,20E-06 | 3,20E-06 | 2,20E-06 |
| 90 | 5 | 1,53E-04 | 3,11E-05 | 2,58E-05 | 3,27E-05 | 4,08E-05 | 3,38E-05 | 2,08E-06 | 1,55E-06 | 2,21E-06 | 3,09E-06 | 1,12E-06 | 1,62E-06 | 2,31E-06 | 3,23E-06 | 4,46E-06 | 1,67E-06 | 2,37E-06 | 3,33E-06 | 2,41E-06 |

| w, град. | u, м/с | C7 (t-2) | C3 (t-1) | C6 (t-1) | C7 (t-1) | C8 (t-1) | C11 (t-1) | C1 (t) | C2 (t) | C3 (t) | C4 (t) | C5 (t) | C6 (t) | C7 (t) | C8 (t) | C9 (t) | C10 (t) | C11 (t) | C12 (t) | C13 (t) |
|----------|--------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 90 | 5 | 1,83E-04 | 6,23E-05 | 5,26E-05 | 6,33E-05 | 7,51E-05 | 6,33E-05 | 6,08E-06 | 4,60E-06 | 6,26E-06 | 8,40E-06 | 3,38E-06 | 4,67E-06 | 6,35E-06 | 8,52E-06 | 1,13E-05 | 4,67E-06 | 6,35E-06 | 8,52E-06 | 6,26E-06 |
| 90 | 5 | 2,09E-04 | 1,45E-04 | 1,26E-04 | 1,45E-04 | 1,62E-04 | 1,41E-04 | 1,67E-05 | 1,24E-05 | 1,70E-05 | 2,29E-05 | 8,85E-06 | 1,24E-05 | 1,70E-05 | 2,29E-05 | 3,02E-05 | 1,21E-05 | 1,67E-05 | 2,24E-05 | 1,60E-05 |
| 90 | 5 | 1,18E-17 | 3,83E-09 | 1,18E-08 | 4,38E-09 | 1,56E-09 | 4,79E-09 | 1,61E-05 | 2,84E-05 | 1,86E-05 | 1,17E-05 | 4,65E-05 | 3,15E-05 | 2,06E-05 | 1,30E-05 | 7,96E-06 | 3,39E-05 | 2,22E-05 | 1,40E-05 | 2,30E-05 |
| 90 | 5 | 4,77E-15 | 2,11E-08 | 4,75E-08 | 2,11E-08 | 9,04E-09 | 2,04E-08 | 2,03E-05 | 3,02E-05 | 2,09E-05 | 1,40E-05 | 4,25E-05 | 3,02E-05 | 2,09E-05 | 1,40E-05 | 9,16E-06 | 2,94E-05 | 2,03E-05 | 2,03E-05 | 1,92E-05 |
| 90 | 5 | 7,15E-05 | 1,80E-04 | 1,80E-04 | 1,83E-04 | 1,83E-04 | 1,83E-04 | 6,02E-05 | 5,17E-05 | 6,23E-05 | 7,38E-05 | 4,29E-05 | 5,26E-05 | 6,33E-05 | 7,51E-05 | 8,74E-05 | 5,26E-05 | 6,33E-05 | 7,51E-05 | 6,23E-05 |
| 90 | 5 | 5,33E-06 | 1,09E-04 | 1,35E-04 | 1,17E-04 | 9,93E-05 | 1,23E-04 | 1,33E-04 | 1,33E-04 | 1,44E-04 | 1,53E-04 | 1,28E-04 | 1,42E-04 | 1,53E-04 | 1,63E-04 | 1,69E-04 | 1,47E-04 | 1,59E-04 | 1,69E-04 | 1,63E-04 |
| 90 | 5 | 1,57E-06 | 1,15E-04 | 1,49E-04 | 1,22E-04 | 9,70E-05 | 1,25E-04 | 1,66E-04 | 1,66E-04 | 1,78E-04 | 1,87E-04 | 1,59E-04 | 1,74E-04 | 1,87E-04 | 1,96E-04 | 2,01E-04 | 1,78E-04 | 1,91E-04 | 2,01E-04 | 1,91E-04 |
| 90 | 5 | 1,18E-08 | 3,39E-05 | 4,65E-05 | 3,15E-05 | 2,06E-05 | 2,84E-05 | 2,70E-04 | 2,70E-04 | 2,63E-04 | 2,48E-04 | 2,55E-04 | 2,55E-04 | 2,48E-04 | 2,34E-04 | 2,15E-04 | 2,34E-04 | 2,28E-04 | 2,15E-04 | 2,03E-04 |
| 180 | 0,5 | 3,65E-08 | 1,60E-07 | 8,02E-10 | 6,67E-09 | 3,26E-08 | 1,64E-10 | 5,23E-07 | 4,87E-09 | 3,16E-08 | 1,29E-07 | 1,78E-11 | 1,84E-10 | 1,20E-09 | 4,87E-09 | 1,24E-08 | 4,37E-12 | 2,84E-11 | 1,15E-10 | 4,21E-13 |
| 180 | 0,5 | 2,15E-07 | 5,09E-07 | 2,47E-08 | 3,46E-08 | 3,46E-08 | 1,68E-09 | 9,96E-07 | 6,44E-08 | 8,73E-08 | 8,73E-08 | 2,26E-09 | 4,16E-09 | 5,64E-09 | 5,64E-09 | 4,16E-09 | 1,98E-10 | 2,69E-10 | 2,69E-10 | 9,45E-12 |
| 180 | 0,5 | 2,39E-06 | 1,01E-05 | 1,28E-08 | 1,18E-07 | 3,60E-07 | 4,55E-10 | 2,86E-05 | 1,02E-07 | 6,65E-07 | 1,70E-06 | 5,51E-11 | 9,24E-10 | 6,05E-09 | 1,55E-08 | 1,55E-08 | 3,28E-12 | 2,15E-11 | 5,51E-11 | 2,98E-14 |
| 180 | 0,5 | 1,01E-07 | 2,54E-07 | 4,41E-08 | 2,67E-08 | 1,26E-08 | 2,19E-09 | 5,60E-07 | 1,13E-07 | 7,18E-08 | 3,62E-08 | 1,45E-08 | 1,16E-08 | 7,32E-09 | 3,69E-09 | 1,48E-09 | 9,39E-10 | 5,95E-10 | 3,00E-10 | 3,85E-11 |
| 180 | 0,5 | 2,33E-06 | 6,04E-06 | 3,74E-07 | 1,87E-07 | 4,65E-08 | 2,88E-09 | 1,53E-05 | 1,37E-06 | 7,47E-07 | 2,23E-07 | 3,65E-08 | 3,65E-08 | 2,00E-08 | 5,97E-09 | 9,75E-10 | 5,33E-10 | 2,91E-10 | 8,71E-11 | 2,32E-12 |
| 180 | 0,5 | 3,37E-06 | 6,26E-06 | 3,99E-07 | 9,10E-07 | 1,58E-06 | 1,01E-07 | 1,08E-05 | 8,86E-07 | 1,88E-06 | 3,09E-06 | 4,41E-08 | 1,20E-07 | 2,54E-07 | 4,18E-07 | 5,37E-07 | 1,26E-08 | 2,67E-08 | 4,41E-08 | 2,19E-09 |
| 180 | 0,5 | 1,01E-05 | 2,86E-05 | 1,02E-07 | 4,36E-06 | 7,32E-05 | 2,60E-07 | 5,83E-05 | 4,67E-07 | 1,17E-05 | 1,30E-04 | 7,47E-10 | 4,18E-08 | 1,04E-06 | 1,17E-05 | 5,83E-05 | 1,67E-09 | 4,18E-08 | 4,67E-07 | 7,47E-10 |
| 180 | 0,5 | 3,47E-12 | 4,48E-10 | 7,59E-12 | 2,64E-08 | 1,20E-05 | 2,03E-07 | 1,20E-08 | 4,54E-10 | 3,18E-07 | 4,33E-05 | 6,47E-13 | 2,33E-09 | 1,64E-06 | 2,23E-04 | 7,29E-03 | 1,13E-08 | 2,39E-06 | 1,32E-04 | 1,65E-07 |
| 180 | 0,5 | 6,57E-02 | 6,53E-02 | 5,93E-04 | 5,93E-04 | 5,38E-06 | 4,89E-08 | 5,56E-02 | 1,79E-03 | 1,79E-03 | 5,77E-05 | 5,98E-08 | 1,86E-06 | 1,86E-06 | 5,98E-08 | 6,21E-11 | 6,21E-11 | 6,21E-11 | 2,00E-12 | 6,68E-17 |
| 180 | 0,5 | 3,81E-05 | 5,79E-05 | 1,89E-05 | 8,98E-06 | 2,93E-06 | 9,57E-07 | 7,87E-05 | 2,87E-05 | 1,47E-05 | 5,35E-06 | 5,35E-06 | 3,82E-06 | 1,95E-06 | 7,12E-07 | 1,86E-07 | 3,64E-07 | 1,86E-07 | 6,78E-08 | 1,26E-08 |
| 180 | 0,5 | 7,05E-04 | 1,15E-03 | 1,64E-06 | 4,33E-05 | 2,23E-04 | 3,18E-07 | 1,91E-03 | 9,09E-06 | 1,32E-04 | 5,03E-04 | 2,98E-09 | 1,65E-07 | 2,39E-06 | 9,09E-06 | 9,09E-06 | 7,81E-10 | 1,13E-08 | 4,32E-08 | 1,41E-11 |
| 180 | 0,5 | 4,32E-34 | 1,81E-22 | 1,57E-19 | 1,17E-13 | 1,02E-10 | 8,78E-08 | 3,32E-16 | 3,66E-14 | 4,44E-10 | 4,89E-08 | 3,32E-16 | 4,44E-10 | 5,38E-06 | 5,93E-04 | 5,93E-04 | 4,89E-08 | 5,93E-04 | 6,53E-02 | 5,93E-04 |
| 180 | 0,5 | 7,46E-05 | 1,03E-04 | 2,29E-05 | 2,29E-05 | 1,78E-05 | 3,97E-06 | 1,34E-04 | 3,40E-05 | 3,40E-05 | 2,71E-05 | 5,48E-06 | 6,89E-06 | 6,89E-06 | 5,48E-06 | 3,47E-06 | 1,11E-06 | 1,11E-06 | 8,83E-07 | 1,42E-07 |
| 180 | 0,5 | 1,35E-04 | 1,64E-04 | 3,52E-05 | 5,17E-05 | 6,27E-05 | 1,35E-05 | 1,92E-04 | 4,64E-05 | 6,61E-05 | 7,89E-05 | 7,87E-06 | 1,34E-05 | 1,91E-05 | 2,28E-05 | 2,28E-05 | 3,24E-06 | 4,62E-06 | 5,52E-06 | 9,37E-07 |
| 180 | 0,5 | 1,38E-09 | 1,55E-08 | 1,70E-06 | 1,70E-06 | 6,65E-07 | 7,32E-05 | 9,34E-08 | 5,22E-06 | 5,22E-06 | 2,33E-06 | 5,83E-05 | 1,30E-04 | 1,30E-04 | 5,83E-05 | 1,17E-05 | 1,46E-03 | 1,46E-03 | 6,52E-04 | 7,29E-03 |
| 180 | 0,5 | 1,29E-03 | 1,49E-03 | 1,43E-04 | 5,84E-04 | 1,49E-03 | 1,43E-04 | 1,62E-03 | 2,02E-04 | 7,03E-04 | 1,62E-03 | 1,09E-05 | 5,78E-05 | 2,02E-04 | 4,63E-04 | 7,03E-04 | 1,09E-05 | 3,81E-05 | 8,76E-05 | 4,75E-06 |
| 180 | 0,5 | 2,57E-13 | 5,83E-11 | 2,64E-08 | 2,03E-07 | 2,03E-07 | 9,18E-05 | 2,33E-09 | 3,18E-07 | 1,64E-06 | 1,64E-06 | 1,64E-06 | 4,33E-05 | 2,23E-04 | 2,23E-04 | 4,33E-05 | 1,15E-03 | 5,89E-03 | 5,89E-03 | 3,03E-02 |
| 180 | 0,5 | 2,41E-03 | 2,27E-03 | 8,27E-04 | 8,27E-04 | 5,91E-04 | 2,16E-04 | 2,01E-03 | 8,06E-04 | 8,06E-04 | 5,95E-04 | 1,76E-04 | 2,39E-04 | 2,39E-04 | 1,76E-04 | 9,57E-05 | 5,21E-05 | 5,21E-05 | 3,84E-05 | 8,39E-06 |
| 180 | 0,5 | 1,87E-07 | 7,47E-07 | 4,57E-06 | 1,53E-05 | 2,80E-05 | 1,71E-04 | 2,25E-06 | 1,10E-05 | 3,18E-05 | 5,39E-05 | 1,87E-05 | 9,15E-05 | 2,64E-04 | 4,48E-04 | 4,48E-04 | 4,48E-04 | 1,29E-03 | 2,19E-03 | 3,72E-03 |
| 180 | 0,5 | 1,46E-03 | 1,57E-03 | 6,32E-03 | 1,57E-03 | 1,95E-04 | 7,85E-04 | 1,92E-03 | 6,42E-03 | 1,92E-03 | 3,13E-04 | 6,42E-03 | 3,51E-03 | 1,05E-03 | 1,71E-04 | 1,53E-05 | 1,05E-03 | 3,13E-04 | 5,12E-05 | 5,12E-05 |
| 180 | 0,5 | 4,44E-03 | 3,69E-03 | 1,48E-03 | 2,72E-03 | 3,69E-03 | 1,48E-03 | 3,52E-03 | 1,54E-03 | 2,67E-03 | 3,52E-03 | 3,89E-04 | 8,89E-04 | 1,54E-03 | 2,03E-03 | 2,03E-03 | 3,89E-04 | 6,75E-04 | 8,89E-04 | 2,24E-04 |

| w, град. | u, м/с | C7 (t-2) | C3 (t-1) | C6 (t-1) | C7 (t-1) | C8 (t-1) | C11 (t-1) | C1 (t) | C2 (t) | C3 (t) | C4 (t) | C5 (t) | C6 (t) | C7 (t) | C8 (t) | C9 (t) | C10 (t) | C11 (t) | C12 (t) | C13 (t) |
|----------|--------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 180 | 0,5 | 7,32E-05 | 1,30E-04 | 5,83E-05 | 6,52E-04 | 3,26E-03 | 1,46E-03 | 1,95E-04 | 9,75E-05 | 7,85E-04 | 3,15E-03 | 1,21E-05 | 1,95E-04 | 1,57E-03 | 6,32E-03 | 1,27E-02 | 1,95E-04 | 1,57E-03 | 6,32E-03 | 7,85E-04 |
| 180 | 0,5 | 1,49E-03 | 1,62E-03 | 1,62E-03 | 3,72E-03 | 5,63E-03 | 5,63E-03 | 1,66E-03 | 1,66E-03 | 3,51E-03 | 5,09E-03 | 7,89E-04 | 2,41E-03 | 5,09E-03 | 7,39E-03 | 7,39E-03 | 2,41E-03 | 5,09E-03 | 7,39E-03 | 3,51E-03 |
| 180 | 0,5 | 5,98E-08 | 1,55E-06 | 3,80E-03 | 2,81E-04 | 1,55E-06 | 3,80E-03 | 1,20E-05 | 5,41E-03 | 7,05E-04 | 1,20E-05 | 4,16E-02 | 4,16E-02 | 5,41E-03 | 9,18E-05 | 2,03E-07 | 4,16E-02 | 5,41E-03 | 9,18E-05 | 7,05E-04 |
| 180 | 0,5 | 2,81E-04 | 7,05E-04 | 4,16E-02 | 5,41E-03 | 9,18E-05 | 5,41E-03 | 1,15E-03 | 3,03E-02 | 5,89E-03 | 2,23E-04 | 3,03E-02 | 3,03E-02 | 5,89E-03 | 2,23E-04 | 1,64E-06 | 5,89E-03 | 1,15E-03 | 4,33E-05 | 4,33E-05 |
| 180 | 0,5 | 7,29E-03 | 8,04E-03 | 8,04E-03 | 2,45E-02 | 2,45E-02 | 2,45E-02 | 8,04E-03 | 8,04E-03 | 2,06E-02 | 2,06E-02 | 1,23E-03 | 8,04E-03 | 2,06E-02 | 2,06E-02 | 8,04E-03 | 3,14E-03 | 8,04E-03 | 8,04E-03 | 1,23E-03 |
| 180 | 0,5 | 1,31E-10 | 1,28E-06 | 4,84E-02 | 4,84E-02 | 1,28E-06 | 4,84E-02 | 7,60E-05 | 6,57E-02 | 6,57E-02 | 7,60E-05 | 7,60E-05 | 6,57E-02 | 6,57E-02 | 7,60E-05 | 1,02E-10 | 7,60E-05 | 7,60E-05 | 8,78E-08 | 1,02E-10 |
| 180 | 1 | 2,04E-08 | 1,29E-08 | 2,82E-09 | 2,19E-09 | 1,50E-09 | 3,26E-10 | 8,34E-09 | 1,91E-09 | 1,52E-09 | 1,08E-09 | 3,49E-10 | 3,11E-10 | 2,48E-10 | 1,77E-10 | 1,12E-10 | 4,53E-11 | 3,61E-11 | 2,57E-11 | 4,69E-12 |
| 180 | 1 | 9,31E-09 | 6,82E-09 | 1,38E-09 | 1,74E-09 | 2,02E-09 | 4,09E-10 | 5,20E-09 | 1,13E-09 | 1,39E-09 | 1,60E-09 | 2,13E-10 | 2,82E-10 | 3,47E-10 | 3,99E-10 | 4,27E-10 | 6,56E-11 | 8,08E-11 | 9,28E-11 | 1,76E-11 |
| 180 | 1 | 9,51E-08 | 5,35E-08 | 6,47E-09 | 7,62E-09 | 7,62E-09 | 9,22E-10 | 3,13E-08 | 4,23E-09 | 4,88E-09 | 4,88E-09 | 4,29E-10 | 5,71E-10 | 6,59E-10 | 6,59E-10 | 5,71E-10 | 6,68E-11 | 7,70E-11 | 7,70E-11 | 7,81E-12 |
| 180 | 1 | 5,74E-08 | 3,39E-08 | 7,36E-09 | 7,36E-09 | 6,64E-09 | 1,44E-09 | 2,02E-08 | 4,63E-09 | 4,63E-09 | 4,22E-09 | 8,82E-10 | 9,68E-10 | 9,68E-10 | 8,82E-10 | 7,34E-10 | 1,84E-10 | 1,84E-10 | 1,68E-10 | 3,20E-11 |
| 180 | 1 | 1,14E-07 | 6,74E-08 | 8,85E-09 | 1,29E-08 | 1,67E-08 | 2,19E-09 | 4,08E-08 | 5,94E-09 | 8,34E-09 | 1,05E-08 | 6,88E-10 | 1,08E-09 | 1,52E-09 | 1,91E-09 | 2,14E-09 | 1,77E-10 | 2,48E-10 | 3,11E-10 | 3,61E-11 |
| 180 | 1 | 1,96E-07 | 1,14E-07 | 2,72E-08 | 2,04E-08 | 1,33E-08 | 3,18E-09 | 6,74E-08 | 1,67E-08 | 1,29E-08 | 8,85E-09 | 3,20E-09 | 2,82E-09 | 2,19E-09 | 1,50E-09 | 9,01E-10 | 4,20E-10 | 3,26E-10 | 2,23E-10 | 4,28E-11 |
| 180 | 1 | 1,63E-06 | 8,83E-07 | 2,92E-07 | 2,67E-07 | 2,22E-07 | 7,34E-08 | 4,74E-07 | 1,60E-07 | 1,47E-07 | 1,24E-07 | 4,56E-08 | 4,56E-08 | 4,20E-08 | 3,55E-08 | 2,76E-08 | 1,20E-08 | 1,10E-08 | 9,31E-09 | 2,66E-09 |
| 180 | 1 | 6,54E-06 | 2,61E-06 | 3,37E-07 | 4,89E-07 | 5,89E-07 | 7,90E-08 | 1,33E-06 | 1,89E-07 | 2,62E-07 | 3,08E-07 | 1,95E-08 | 3,17E-08 | 4,39E-08 | 5,16E-08 | 5,16E-08 | 4,51E-09 | 6,47E-09 | 7,62E-09 | 7,84E-10 |
| 180 | 1 | 2,56E-05 | 1,27E-05 | 3,52E-06 | 3,52E-06 | 3,05E-06 | 8,41E-07 | 6,51E-06 | 1,83E-06 | 1,83E-06 | 1,61E-06 | 3,99E-07 | 4,53E-07 | 4,53E-07 | 3,99E-07 | 3,09E-07 | 9,87E-08 | 9,87E-08 | 8,69E-08 | 1,90E-08 |
| 180 | 1 | 7,19E-05 | 3,04E-05 | 4,73E-06 | 8,27E-06 | 1,20E-05 | 1,87E-06 | 1,58E-05 | 2,64E-06 | 4,30E-06 | 5,94E-06 | 3,19E-07 | 6,12E-07 | 9,96E-07 | 1,38E-06 | 1,62E-06 | 1,21E-07 | 1,96E-07 | 2,72E-07 | 3,29E-08 |
| 180 | 1 | 2,79E-04 | 1,03E-04 | 1,80E-05 | 2,31E-05 | 2,31E-05 | 4,01E-06 | 3,78E-05 | 6,79E-06 | 8,42E-06 | 8,42E-06 | 7,95E-07 | 1,22E-06 | 1,51E-06 | 1,51E-06 | 1,22E-06 | 1,77E-07 | 2,20E-07 | 2,20E-07 | 2,57E-08 |
| 180 | 1 | 4,96E-05 | 2,62E-05 | 1,06E-05 | 9,44E-06 | 7,53E-06 | 3,04E-06 | 1,39E-05 | 5,55E-06 | 5,01E-06 | 4,09E-06 | 1,81E-06 | 1,81E-06 | 1,63E-06 | 1,33E-06 | 9,81E-07 | 5,32E-07 | 4,80E-07 | 3,92E-07 | 1,28E-07 |
| 180 | 1 | 1,95E-03 | 7,49E-04 | 1,83E-04 | 1,83E-04 | 1,29E-04 | 3,14E-05 | 2,79E-04 | 6,40E-05 | 6,40E-05 | 4,77E-05 | 8,15E-06 | 1,09E-05 | 1,09E-05 | 8,15E-06 | 4,52E-06 | 1,39E-06 | 1,39E-06 | 1,04E-06 | 1,32E-07 |
| 180 | 1 | 1,84E-03 | 1,24E-03 | 8,65E-05 | 4,27E-04 | 1,24E-03 | 8,65E-05 | 5,38E-04 | 4,10E-05 | 1,48E-04 | 3,50E-04 | 1,32E-06 | 7,36E-06 | 2,67E-05 | 6,29E-05 | 9,66E-05 | 8,61E-07 | 3,12E-06 | 7,36E-06 | 2,38E-07 |
| 180 | 1 | 7,77E-04 | 4,56E-04 | 2,57E-04 | 2,23E-04 | 1,67E-04 | 9,45E-05 | 2,58E-04 | 1,37E-04 | 1,21E-04 | 9,36E-05 | 5,63E-05 | 5,63E-05 | 4,96E-05 | 3,85E-05 | 2,63E-05 | 2,04E-05 | 1,80E-05 | 1,39E-05 | 5,73E-06 |
| 180 | 1 | 1,87E-14 | 1,25E-09 | 2,79E-07 | 7,21E-08 | 9,48E-09 | 2,12E-06 | 7,20E-07 | 2,98E-05 | 1,03E-05 | 2,09E-06 | 4,27E-04 | 2,51E-04 | 8,65E-05 | 1,75E-05 | 2,09E-06 | 1,24E-03 | 4,27E-04 | 8,65E-05 | 1,24E-03 |
| 180 | 1 | 1,18E-08 | 1,32E-06 | 3,79E-06 | 1,09E-05 | 2,21E-05 | 6,36E-05 | 2,65E-05 | 4,77E-05 | 1,15E-04 | 2,08E-04 | 4,77E-05 | 1,55E-04 | 3,75E-04 | 6,75E-04 | 9,06E-04 | 3,75E-04 | 9,06E-04 | 1,63E-03 | 1,63E-03 |
| 180 | 1 | 1,04E-15 | 3,79E-09 | 1,27E-08 | 4,80E-07 | 5,41E-06 | 1,81E-05 | 5,78E-06 | 5,78E-06 | 8,32E-05 | 4,92E-04 | 9,78E-07 | 3,42E-05 | 4,92E-04 | 2,91E-03 | 7,07E-03 | 8,32E-05 | 1,20E-03 | 7,07E-03 | 1,20E-03 |
| 180 | 1 | 1,81E-05 | 4,92E-04 | 7,07E-03 | 1,20E-03 | 8,32E-05 | 1,20E-03 | 1,84E-03 | 7,12E-03 | 1,84E-03 | 2,42E-04 | 7,12E-03 | 3,62E-03 | 9,35E-04 | 1,23E-04 | 8,21E-06 | 9,35E-04 | 2,42E-04 | 3,18E-05 | 3,18E-05 |
| 180 | 1 | 5,38E-04 | 1,52E-03 | 7,49E-04 | 2,16E-03 | 4,36E-03 | 2,16E-03 | 2,19E-03 | 9,06E-04 | 2,19E-03 | 3,95E-03 | 2,08E-04 | 6,75E-04 | 1,63E-03 | 2,94E-03 | 3,95E-03 | 3,75E-04 | 9,06E-04 | 1,63E-03 | 3,75E-04 |
| 180 | 1 | 3,75E-04 | 9,77E-04 | 7,61E-04 | 1,61E-03 | 2,65E-03 | 2,07E-03 | 1,45E-03 | 9,44E-04 | 1,80E-03 | 2,76E-03 | 4,00E-04 | 9,44E-04 | 1,80E-03 | 2,76E-03 | 3,42E-03 | 7,61E-04 | 1,45E-03 | 2,23E-03 | 9,44E-04 |
| 180 | 1 | 1,46E-07 | 1,13E-05 | 9,66E-05 | 9,66E-05 | 6,29E-05 | 5,38E-04 | 1,83E-04 | 7,49E-04 | 7,49E-04 | 5,27E-04 | 1,52E-03 | 2,16E-03 | 2,16E-03 | 1,52E-03 | 7,49E-04 | 4,36E-03 | 4,36E-03 | 3,07E-03 | 6,20E-03 |
| 180 | 1 | 7,79E-06 | 2,38E-04 | 4,06E-04 | 1,18E-03 | 2,00E-03 | 3,58E-03 | 1,21E-03 | 1,21E-03 | 2,86E-03 | 4,39E-03 | 5,13E-04 | 1,86E-03 | 4,39E-03 | 6,74E-03 | 6,74E-03 | 1,86E-03 | 4,60E-03 | 7,06E-03 | 2,99E-03 |

| w, град. | u, м/с | C7 (t-2) | C3 (t-1) | C6 (t-1) | C7 (t-1) | C8 (t-1) | C11 (t-1) | C1 (t) | C2 (t) | C3 (t) | C4 (t) | C5 (t) | C6 (t) | C7 (t) | C8 (t) | C9 (t) | C10 (t) | C11 (t) | C12 (t) | C13 (t) |
|----------|--------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 180 | 1 | 2,80E-08 | 1,62E-05 | 1,23E-04 | 2,42E-04 | 2,42E-04 | 1,84E-03 | 4,27E-04 | 1,24E-03 | 2,11E-03 | 2,11E-03 | 1,24E-03 | 3,58E-03 | 6,10E-03 | 6,10E-03 | 3,58E-03 | 6,10E-03 | 1,04E-02 | 1,04E-02 | 1,04E-02 |
| 180 | 2 | 5,50E-07 | 4,19E-08 | 1,08E-08 | 9,78E-09 | 8,05E-09 | 2,07E-09 | 3,60E-09 | 8,96E-10 | 8,26E-10 | 7,01E-10 | 1,90E-10 | 1,90E-10 | 1,75E-10 | 1,48E-10 | 1,16E-10 | 3,69E-11 | 3,40E-11 | 2,89E-11 | 6,12E-12 |
| 180 | 2 | 1,68E-05 | 7,31E-07 | 1,50E-07 | 1,50E-07 | 1,30E-07 | 2,65E-08 | 3,31E-08 | 6,43E-09 | 6,43E-09 | 5,72E-09 | 9,87E-10 | 1,11E-09 | 1,11E-09 | 9,87E-10 | 7,81E-10 | 1,70E-10 | 1,70E-10 | 1,52E-10 | 2,33E-11 |
| 180 | 2 | 2,18E-04 | 4,52E-06 | 5,36E-07 | 6,79E-07 | 6,79E-07 | 8,05E-08 | 1,23E-07 | 1,39E-08 | 1,66E-08 | 1,66E-08 | 1,08E-09 | 1,56E-09 | 1,87E-09 | 1,87E-09 | 1,56E-09 | 1,46E-10 | 1,76E-10 | 1,76E-10 | 1,37E-11 |
| 180 | 2 | 2,80E-05 | 3,75E-06 | 1,10E-06 | 1,41E-06 | 1,65E-06 | 4,86E-07 | 4,67E-07 | 1,33E-07 | 1,64E-07 | 1,89E-07 | 3,29E-08 | 4,35E-08 | 5,37E-08 | 6,17E-08 | 6,62E-08 | 1,33E-08 | 1,64E-08 | 1,88E-08 | 4,67E-09 |
| 180 | 2 | 7,83E-04 | 4,84E-05 | 1,88E-05 | 1,17E-05 | 5,73E-06 | 2,22E-06 | 2,27E-06 | 6,35E-07 | 4,41E-07 | 2,55E-07 | 1,23E-07 | 1,03E-07 | 7,14E-08 | 4,14E-08 | 2,00E-08 | 1,39E-08 | 9,64E-09 | 5,58E-09 | 1,08E-09 |
| 180 | 2 | 8,10E-03 | 7,83E-04 | 1,58E-04 | 2,18E-04 | 2,18E-04 | 4,39E-05 | 2,38E-05 | 3,57E-06 | 4,52E-06 | 4,52E-06 | 3,34E-07 | 5,36E-07 | 6,79E-07 | 6,79E-07 | 5,36E-07 | 6,35E-08 | 8,05E-08 | 8,05E-08 | 7,52E-09 |
| 180 | 2 | 1,32E-03 | 2,43E-04 | 1,20E-04 | 1,20E-04 | 1,07E-04 | 5,30E-05 | 3,74E-05 | 1,56E-05 | 1,56E-05 | 1,42E-05 | 5,37E-06 | 5,92E-06 | 5,92E-06 | 5,37E-06 | 4,42E-06 | 2,04E-06 | 2,04E-06 | 1,85E-06 | 6,35E-07 |
| 180 | 2 | 1,69E-03 | 5,35E-04 | 1,49E-04 | 2,58E-04 | 3,72E-04 | 1,04E-04 | 6,39E-05 | 1,51E-05 | 2,33E-05 | 3,11E-05 | 2,68E-06 | 4,77E-06 | 7,35E-06 | 9,81E-06 | 1,13E-05 | 1,30E-06 | 2,01E-06 | 2,68E-06 | 4,74E-07 |
| 180 | 2 | 6,88E-04 | 1,90E-04 | 1,07E-04 | 1,07E-04 | 9,86E-05 | 5,57E-05 | 3,80E-05 | 1,89E-05 | 1,89E-05 | 1,76E-05 | 8,18E-06 | 8,77E-06 | 8,77E-06 | 8,18E-06 | 7,11E-06 | 3,79E-06 | 3,79E-06 | 3,54E-06 | 1,53E-06 |
| 180 | 2 | 1,31E-03 | 1,49E-03 | 1,49E-03 | 7,83E-04 | 3,00E-04 | 3,00E-04 | 1,58E-04 | 7,77E-05 | 4,84E-05 | 2,38E-05 | 2,38E-05 | 1,88E-05 | 1,17E-05 | 5,73E-06 | 2,22E-06 | 3,57E-06 | 2,22E-06 | 1,09E-06 | 3,34E-07 |
| 180 | 2 | 6,96E-04 | 3,84E-04 | 1,77E-04 | 2,61E-04 | 3,49E-04 | 1,61E-04 | 1,16E-04 | 4,73E-05 | 6,55E-05 | 8,38E-05 | 1,63E-05 | 2,46E-05 | 3,41E-05 | 4,36E-05 | 5,13E-05 | 1,18E-05 | 1,63E-05 | 2,09E-05 | 7,21E-06 |
| 180 | 2 | 5,29E-04 | 2,05E-03 | 5,69E-04 | 1,49E-03 | 2,82E-03 | 7,83E-04 | 4,08E-04 | 7,77E-05 | 1,58E-04 | 2,54E-04 | 9,21E-06 | 2,38E-05 | 4,84E-05 | 7,77E-05 | 9,85E-05 | 5,73E-06 | 1,17E-05 | 1,88E-05 | 2,22E-06 |
| 180 | 2 | 2,08E-04 | 8,10E-03 | 5,14E-03 | 8,10E-03 | 8,10E-03 | 5,14E-03 | 2,05E-03 | 5,68E-04 | 7,83E-04 | 7,83E-04 | 8,33E-05 | 1,58E-04 | 2,18E-04 | 2,18E-04 | 1,58E-04 | 3,19E-05 | 4,39E-05 | 4,39E-05 | 6,43E-06 |
| 180 | 2 | 5,35E-04 | 1,32E-03 | 8,58E-04 | 1,32E-03 | 1,76E-03 | 1,14E-03 | 6,96E-04 | 3,45E-04 | 4,90E-04 | 6,19E-04 | 1,35E-04 | 2,16E-04 | 3,07E-04 | 3,88E-04 | 4,36E-04 | 1,20E-04 | 1,71E-04 | 2,16E-04 | 8,46E-05 |
| 180 | 2 | 1,34E-10 | 1,31E-06 | 2,72E-06 | 5,64E-06 | 9,74E-06 | 2,02E-05 | 9,86E-05 | 1,14E-04 | 2,03E-04 | 3,12E-04 | 9,86E-05 | 2,03E-04 | 3,61E-04 | 5,56E-04 | 7,42E-04 | 3,12E-04 | 5,56E-04 | 8,58E-04 | 7,42E-04 |
| 180 | 2 | 3,23E-11 | 7,61E-07 | 3,92E-06 | 3,92E-06 | 3,27E-06 | 1,68E-05 | 9,86E-05 | 2,34E-04 | 2,34E-04 | 2,03E-04 | 4,17E-04 | 4,82E-04 | 4,82E-04 | 4,17E-04 | 3,12E-04 | 8,58E-04 | 8,58E-04 | 7,42E-04 | 1,32E-03 |
| 180 | 2 | 1,58E-04 | 2,15E-03 | 3,45E-03 | 2,72E-03 | 1,69E-03 | 2,72E-03 | 1,91E-03 | 1,59E-03 | 1,33E-03 | 9,23E-04 | 9,23E-04 | 9,23E-04 | 7,70E-04 | 5,35E-04 | 3,10E-04 | 4,46E-04 | 3,72E-04 | 2,58E-04 | 1,49E-04 |
| 180 | 2 | 4,00E-10 | 3,19E-05 | 2,18E-04 | 1,58E-04 | 8,33E-05 | 5,69E-04 | 1,34E-03 | 2,72E-03 | 2,15E-03 | 1,34E-03 | 3,45E-03 | 3,45E-03 | 2,72E-03 | 1,69E-03 | 8,32E-04 | 3,45E-03 | 2,72E-03 | 1,69E-03 | 2,15E-03 |
| 180 | 5 | 3,42E-07 | 1,35E-08 | 7,96E-09 | 8,27E-09 | 8,49E-09 | 5,01E-09 | 4,50E-10 | 2,55E-10 | 2,64E-10 | 2,70E-10 | 1,42E-10 | 1,48E-10 | 1,53E-10 | 1,57E-10 | 1,59E-10 | 8,50E-11 | 8,80E-11 | 9,00E-11 | 4,99E-11 |
| 180 | 5 | 2,17E-06 | 9,38E-08 | 5,70E-08 | 5,87E-08 | 5,95E-08 | 3,61E-08 | 3,08E-09 | 1,77E-09 | 1,82E-09 | 1,84E-09 | 9,94E-10 | 1,03E-09 | 1,06E-09 | 1,07E-09 | 1,07E-09 | 5,95E-10 | 6,10E-10 | 6,18E-10 | 3,47E-10 |
| 180 | 5 | 2,31E-06 | 1,27E-07 | 8,03E-08 | 8,34E-08 | 8,56E-08 | 5,39E-08 | 5,46E-09 | 3,28E-09 | 3,39E-09 | 3,47E-09 | 1,92E-09 | 2,01E-09 | 2,08E-09 | 2,13E-09 | 2,15E-09 | 1,22E-09 | 1,26E-09 | 1,29E-09 | 7,59E-10 |
| 180 | 5 | 4,49E-06 | 2,30E-07 | 1,50E-07 | 1,48E-07 | 1,44E-07 | 9,38E-08 | 8,49E-09 | 5,21E-09 | 5,14E-09 | 5,01E-09 | 3,12E-09 | 3,12E-09 | 3,08E-09 | 3,00E-09 | 2,89E-09 | 1,84E-09 | 1,82E-09 | 1,77E-09 | 1,06E-09 |
| 180 | 5 | 8,34E-06 | 3,97E-07 | 2,39E-07 | 2,51E-07 | 2,60E-07 | 1,56E-07 | 1,27E-08 | 7,18E-09 | 7,51E-09 | 7,73E-09 | 3,93E-09 | 4,17E-09 | 4,36E-09 | 4,49E-09 | 4,56E-09 | 2,39E-09 | 2,49E-09 | 2,57E-09 | 1,41E-09 |
| 180 | 5 | 8,42E-06 | 5,15E-07 | 3,27E-07 | 3,42E-07 | 3,52E-07 | 2,23E-07 | 2,17E-08 | 1,30E-08 | 1,35E-08 | 1,38E-08 | 7,56E-09 | 7,96E-09 | 8,27E-09 | 8,49E-09 | 8,60E-09 | 4,82E-09 | 5,01E-09 | 5,14E-09 | 3,00E-09 |
| 180 | 5 | 6,35E-06 | 4,37E-07 | 2,94E-07 | 2,97E-07 | 2,97E-07 | 2,00E-07 | 2,20E-08 | 1,40E-08 | 1,42E-08 | 1,42E-08 | 8,69E-09 | 8,89E-09 | 8,99E-09 | 8,99E-09 | 8,89E-09 | 5,58E-09 | 5,65E-09 | 5,65E-09 | 3,51E-09 |
| 180 | 5 | 1,60E-05 | 1,17E-06 | 8,01E-07 | 8,01E-07 | 7,89E-07 | 5,39E-07 | 5,60E-08 | 3,57E-08 | 3,57E-08 | 2,22E-08 | 2,22E-08 | 2,25E-08 | 2,25E-08 | 2,22E-08 | 2,17E-08 | 1,40E-08 | 1,40E-08 | 1,38E-08 | 8,60E-09 |
| 180 | 5 | 6,04E-05 | 6,31E-06 | 4,57E-06 | 4,49E-06 | 4,34E-06 | 3,15E-06 | 3,52E-07 | 2,33E-07 | 2,30E-07 | 2,23E-07 | 1,50E-07 | 1,50E-07 | 1,48E-07 | 1,44E-07 | 1,37E-07 | 9,52E-08 | 9,38E-08 | 9,11E-08 | 5,87E-08 |
| 180 | 5 | 8,23E-05 | 8,34E-06 | 6,07E-06 | 5,84E-06 | 5,50E-06 | 4,01E-06 | 3,97E-07 | 2,60E-07 | 2,51E-07 | 2,39E-07 | 1,65E-07 | 1,62E-07 | 1,56E-07 | 1,49E-07 | 1,39E-07 | 9,89E-08 | 9,56E-08 | 9,09E-08 | 5,75E-08 |

| w, град. | u, м/с | C7 (t-2) | C3 (t-1) | C6 (t-1) | C7 (t-1) | C8 (t-1) | C11 (t-1) | C1 (t) | C2 (t) | C3 (t) | C4 (t) | C5 (t) | C6 (t) | C7 (t) | C8 (t) | C9 (t) | C10 (t) | C11 (t) | C12 (t) | C13 (t) |
|----------|--------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 180 | 5 | 8,46E-05 | 1,14E-05 | 8,00E-06 | 8,42E-06 | 8,71E-06 | 6,10E-06 | 7,66E-07 | 4,93E-07 | 5,15E-07 | 5,31E-07 | 3,08E-07 | 3,27E-07 | 3,42E-07 | 3,52E-07 | 3,57E-07 | 2,14E-07 | 2,23E-07 | 2,30E-07 | 1,44E-07 |
| 180 | 5 | 1,87E-04 | 4,86E-05 | 3,68E-05 | 3,83E-05 | 3,91E-05 | 2,96E-05 | 4,49E-06 | 3,04E-06 | 3,15E-06 | 3,20E-06 | 1,99E-06 | 2,09E-06 | 2,17E-06 | 2,20E-06 | 2,20E-06 | 1,42E-06 | 1,47E-06 | 1,49E-06 | 9,76E-07 |
| 180 | 5 | 1,53E-04 | 4,08E-05 | 3,11E-05 | 3,27E-05 | 3,38E-05 | 2,58E-05 | 4,46E-06 | 3,09E-06 | 3,23E-06 | 3,33E-06 | 2,08E-06 | 2,21E-06 | 2,31E-06 | 2,37E-06 | 2,41E-06 | 1,55E-06 | 1,62E-06 | 1,67E-06 | 1,12E-06 |
| 180 | 5 | 1,83E-04 | 7,51E-05 | 6,23E-05 | 6,33E-05 | 6,33E-05 | 5,26E-05 | 1,13E-05 | 8,40E-06 | 8,52E-06 | 8,52E-06 | 6,08E-06 | 6,26E-06 | 6,35E-06 | 6,35E-06 | 6,26E-06 | 4,60E-06 | 4,67E-06 | 4,67E-06 | 3,38E-06 |
| 180 | 5 | 2,09E-04 | 1,62E-04 | 1,45E-04 | 1,45E-04 | 1,41E-04 | 1,26E-04 | 3,02E-05 | 2,29E-05 | 2,29E-05 | 2,24E-05 | 1,67E-05 | 1,70E-05 | 1,70E-05 | 1,67E-05 | 1,60E-05 | 1,24E-05 | 1,24E-05 | 1,21E-05 | 8,85E-06 |
| 180 | 5 | 1,18E-17 | 1,56E-09 | 3,83E-09 | 4,38E-09 | 4,79E-09 | 1,18E-08 | 7,96E-06 | 1,17E-05 | 1,30E-05 | 1,40E-05 | 1,61E-05 | 1,86E-05 | 2,06E-05 | 2,22E-05 | 2,30E-05 | 2,84E-05 | 3,15E-05 | 3,39E-05 | 4,65E-05 |
| 180 | 5 | 4,77E-15 | 9,04E-09 | 2,11E-08 | 2,11E-08 | 2,04E-08 | 4,75E-08 | 9,16E-06 | 1,40E-05 | 1,40E-05 | 2,03E-05 | 2,03E-05 | 2,09E-05 | 2,09E-05 | 2,03E-05 | 1,92E-05 | 3,02E-05 | 3,02E-05 | 2,94E-05 | 4,25E-05 |
| 180 | 5 | 7,15E-05 | 1,83E-04 | 1,80E-04 | 1,83E-04 | 1,83E-04 | 1,80E-04 | 8,74E-05 | 7,38E-05 | 7,51E-05 | 7,51E-05 | 6,02E-05 | 6,23E-05 | 6,33E-05 | 6,33E-05 | 6,23E-05 | 5,17E-05 | 5,26E-05 | 5,26E-05 | 4,29E-05 |
| 180 | 5 | 5,33E-06 | 9,93E-05 | 1,09E-04 | 1,17E-04 | 1,23E-04 | 1,35E-04 | 1,69E-04 | 1,53E-04 | 1,63E-04 | 1,69E-04 | 1,33E-04 | 1,44E-04 | 1,53E-04 | 1,59E-04 | 1,63E-04 | 1,33E-04 | 1,42E-04 | 1,47E-04 | 1,28E-04 |
| 180 | 5 | 1,57E-06 | 9,70E-05 | 1,15E-04 | 1,22E-04 | 1,25E-04 | 1,49E-04 | 2,01E-04 | 1,87E-04 | 1,96E-04 | 2,01E-04 | 1,66E-04 | 1,78E-04 | 1,87E-04 | 1,91E-04 | 1,91E-04 | 1,66E-04 | 1,74E-04 | 1,78E-04 | 1,59E-04 |
| 180 | 5 | 1,18E-08 | 2,06E-05 | 3,39E-05 | 3,15E-05 | 2,84E-05 | 4,65E-05 | 2,15E-04 | 2,48E-04 | 2,34E-04 | 2,15E-04 | 2,70E-04 | 2,63E-04 | 2,48E-04 | 2,28E-04 | 2,03E-04 | 2,70E-04 | 2,55E-04 | 2,34E-04 | 2,55E-04 |
| 270 | 0,5 | 3,65E-08 | 3,26E-08 | 1,60E-07 | 6,67E-09 | 1,64E-10 | 8,02E-10 | 1,24E-08 | 1,29E-07 | 4,87E-09 | 1,15E-10 | 5,23E-07 | 3,16E-08 | 1,20E-09 | 2,84E-11 | 4,21E-13 | 4,87E-09 | 1,84E-10 | 4,37E-12 | 1,78E-11 |
| 270 | 0,5 | 2,15E-07 | 3,46E-08 | 5,09E-07 | 3,46E-08 | 1,68E-09 | 2,47E-08 | 4,16E-09 | 8,73E-08 | 5,64E-09 | 2,69E-10 | 9,96E-07 | 8,73E-08 | 5,64E-09 | 2,69E-10 | 9,45E-12 | 6,44E-08 | 4,16E-09 | 1,98E-10 | 2,26E-09 |
| 270 | 0,5 | 2,39E-06 | 3,60E-07 | 1,01E-05 | 1,18E-07 | 4,55E-10 | 1,28E-08 | 1,55E-08 | 1,70E-06 | 1,55E-08 | 5,51E-11 | 2,86E-05 | 6,65E-07 | 6,05E-09 | 2,15E-11 | 2,98E-14 | 1,02E-07 | 9,24E-10 | 3,28E-12 | 5,51E-11 |
| 270 | 0,5 | 1,01E-07 | 1,26E-08 | 2,54E-07 | 2,67E-08 | 2,19E-09 | 4,41E-08 | 1,48E-09 | 3,62E-08 | 3,69E-09 | 3,00E-10 | 5,60E-07 | 7,18E-08 | 7,32E-09 | 5,95E-10 | 3,85E-11 | 1,13E-07 | 1,16E-08 | 9,39E-10 | 1,45E-08 |
| 270 | 0,5 | 2,33E-06 | 4,65E-08 | 6,04E-06 | 1,87E-07 | 2,88E-09 | 3,74E-07 | 9,75E-10 | 2,23E-07 | 5,97E-09 | 8,71E-11 | 1,53E-05 | 7,47E-07 | 2,00E-08 | 2,91E-10 | 2,32E-12 | 1,37E-06 | 3,65E-08 | 5,33E-10 | 3,65E-08 |
| 270 | 0,5 | 3,37E-06 | 1,58E-06 | 6,26E-06 | 9,10E-07 | 1,01E-07 | 3,99E-07 | 5,37E-07 | 3,09E-06 | 4,18E-07 | 4,41E-08 | 1,08E-05 | 1,88E-06 | 2,54E-07 | 2,67E-08 | 2,19E-09 | 8,86E-07 | 1,20E-07 | 1,26E-08 | 4,41E-08 |
| 270 | 0,5 | 1,01E-05 | 7,32E-05 | 2,86E-05 | 4,36E-06 | 2,60E-07 | 1,02E-07 | 5,83E-05 | 1,30E-04 | 1,17E-05 | 4,67E-07 | 5,83E-05 | 1,17E-05 | 1,04E-06 | 4,18E-08 | 7,47E-10 | 4,67E-07 | 4,18E-08 | 1,67E-09 | 7,47E-10 |
| 270 | 0,5 | 3,47E-12 | 1,20E-05 | 4,48E-10 | 2,64E-08 | 2,03E-07 | 7,59E-12 | 7,29E-03 | 4,33E-05 | 2,23E-04 | 1,32E-04 | 1,20E-08 | 3,18E-07 | 1,64E-06 | 2,39E-06 | 1,65E-07 | 4,54E-10 | 2,33E-09 | 1,13E-08 | 6,47E-13 |
| 270 | 0,5 | 6,57E-02 | 5,38E-06 | 6,53E-02 | 5,93E-04 | 4,89E-08 | 5,93E-04 | 6,21E-11 | 5,77E-05 | 5,98E-08 | 2,00E-12 | 5,56E-02 | 1,79E-03 | 1,86E-06 | 6,21E-11 | 6,68E-17 | 1,79E-03 | 1,86E-06 | 6,21E-11 | 5,98E-08 |
| 270 | 0,5 | 3,81E-05 | 2,93E-06 | 5,79E-05 | 8,98E-06 | 9,57E-07 | 1,89E-05 | 1,86E-07 | 5,35E-06 | 7,12E-07 | 6,78E-08 | 7,87E-05 | 1,47E-05 | 1,95E-06 | 1,86E-07 | 1,26E-08 | 2,87E-05 | 3,82E-06 | 3,64E-07 | 5,35E-06 |
| 270 | 0,5 | 7,05E-04 | 2,23E-04 | 1,15E-03 | 4,33E-05 | 3,18E-07 | 1,64E-06 | 9,09E-06 | 5,03E-04 | 9,09E-06 | 4,32E-08 | 1,91E-03 | 1,32E-04 | 2,39E-06 | 1,13E-08 | 1,41E-11 | 9,09E-06 | 1,65E-07 | 7,81E-10 | 2,98E-09 |
| 270 | 0,5 | 4,32E-34 | 1,02E-10 | 1,81E-22 | 1,17E-13 | 8,78E-08 | 1,57E-19 | 5,93E-04 | 4,89E-08 | 5,93E-04 | 6,53E-02 | 3,32E-16 | 4,44E-10 | 5,38E-06 | 5,93E-04 | 5,93E-04 | 3,66E-14 | 4,44E-10 | 4,89E-08 | 3,32E-16 |
| 270 | 0,5 | 7,46E-05 | 1,78E-05 | 1,03E-04 | 2,29E-05 | 3,97E-06 | 2,29E-05 | 3,47E-06 | 2,71E-05 | 5,48E-06 | 8,83E-07 | 1,34E-04 | 3,40E-05 | 6,89E-06 | 1,11E-06 | 1,42E-07 | 3,40E-05 | 6,89E-06 | 1,11E-06 | 5,48E-06 |
| 270 | 0,5 | 1,35E-04 | 6,27E-05 | 1,64E-04 | 5,17E-05 | 1,35E-05 | 3,52E-05 | 2,28E-05 | 7,89E-05 | 2,28E-05 | 5,52E-06 | 1,92E-04 | 6,61E-05 | 1,91E-05 | 4,62E-06 | 9,37E-07 | 4,64E-05 | 1,34E-05 | 3,24E-06 | 7,87E-06 |
| 270 | 0,5 | 1,38E-09 | 6,65E-07 | 1,55E-08 | 1,70E-06 | 7,32E-05 | 1,70E-06 | 1,17E-05 | 2,33E-06 | 5,83E-05 | 6,52E-04 | 9,34E-08 | 5,22E-06 | 1,30E-04 | 1,46E-03 | 7,29E-03 | 5,22E-06 | 1,30E-04 | 1,46E-03 | 5,83E-05 |
| 270 | 0,5 | 1,29E-03 | 1,49E-03 | 1,49E-03 | 5,84E-04 | 1,43E-04 | 1,43E-04 | 7,03E-04 | 1,62E-03 | 4,63E-04 | 8,76E-05 | 1,62E-03 | 7,03E-04 | 2,02E-04 | 3,81E-05 | 4,75E-06 | 2,02E-04 | 5,78E-05 | 1,09E-05 | 1,09E-05 |
| 270 | 0,5 | 2,57E-13 | 2,03E-07 | 5,83E-11 | 2,03E-07 | 9,18E-05 | 2,64E-08 | 4,33E-05 | 1,64E-06 | 2,23E-04 | 5,89E-03 | 2,33E-09 | 1,64E-06 | 2,23E-04 | 5,89E-03 | 3,03E-02 | 3,18E-07 | 4,33E-05 | 1,15E-03 | 1,64E-06 |
| 270 | 0,5 | 2,41E-03 | 5,91E-04 | 2,27E-03 | 8,27E-04 | 2,16E-04 | 8,27E-04 | 9,57E-05 | 5,95E-04 | 1,76E-04 | 3,84E-05 | 2,01E-03 | 8,06E-04 | 2,39E-04 | 5,21E-05 | 8,39E-06 | 8,06E-04 | 2,39E-04 | 5,21E-05 | 1,76E-04 |

| w, град. | u, м/с | C7 (t-2) | C3 (t-1) | C6 (t-1) | C7 (t-1) | C8 (t-1) | C11 (t-1) | C1 (t) | C2 (t) | C3 (t) | C4 (t) | C5 (t) | C6 (t) | C7 (t) | C8 (t) | C9 (t) | C10 (t) | C11 (t) | C12 (t) | C13 (t) |
|----------|--------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 270 | 0,5 | 1,87E-07 | 2,80E-05 | 7,47E-07 | 1,53E-05 | 1,71E-04 | 4,57E-06 | 4,48E-04 | 5,39E-05 | 4,48E-04 | 2,19E-03 | 2,25E-06 | 3,18E-05 | 2,64E-04 | 1,29E-03 | 3,72E-03 | 1,10E-05 | 9,15E-05 | 4,48E-04 | 1,87E-05 |
| 270 | 0,5 | 1,46E-03 | 1,95E-04 | 1,57E-03 | 1,57E-03 | 7,85E-04 | 6,32E-03 | 1,53E-05 | 3,13E-04 | 1,71E-04 | 5,12E-05 | 1,92E-03 | 1,92E-03 | 1,05E-03 | 3,13E-04 | 5,12E-05 | 6,42E-03 | 3,51E-03 | 1,05E-03 | 6,42E-03 |
| 270 | 0,5 | 4,44E-03 | 3,69E-03 | 3,69E-03 | 2,72E-03 | 1,48E-03 | 1,48E-03 | 2,03E-03 | 3,52E-03 | 2,03E-03 | 8,89E-04 | 3,52E-03 | 2,67E-03 | 1,54E-03 | 6,75E-04 | 2,24E-04 | 1,54E-03 | 8,89E-04 | 3,89E-04 | 3,89E-04 |
| 270 | 0,5 | 7,32E-05 | 3,26E-03 | 1,30E-04 | 6,52E-04 | 1,46E-03 | 5,83E-05 | 1,27E-02 | 3,15E-03 | 6,32E-03 | 6,32E-03 | 1,95E-04 | 7,85E-04 | 1,57E-03 | 1,57E-03 | 7,85E-04 | 9,75E-05 | 1,95E-04 | 1,95E-04 | 1,21E-05 |
| 270 | 0,5 | 1,49E-03 | 5,63E-03 | 1,62E-03 | 3,72E-03 | 5,63E-03 | 1,62E-03 | 7,39E-03 | 5,09E-03 | 7,39E-03 | 7,39E-03 | 1,66E-03 | 3,51E-03 | 5,09E-03 | 5,09E-03 | 3,51E-03 | 1,66E-03 | 2,41E-03 | 2,41E-03 | 7,89E-04 |
| 270 | 0,5 | 5,98E-08 | 1,55E-06 | 1,55E-06 | 2,81E-04 | 3,80E-03 | 3,80E-03 | 2,03E-07 | 1,20E-05 | 9,18E-05 | 9,18E-05 | 1,20E-05 | 7,05E-04 | 5,41E-03 | 5,41E-03 | 7,05E-04 | 5,41E-03 | 4,16E-02 | 4,16E-02 | 4,16E-02 |
| 270 | 0,5 | 2,81E-04 | 9,18E-05 | 7,05E-04 | 5,41E-03 | 5,41E-03 | 4,16E-02 | 1,64E-06 | 2,23E-04 | 2,23E-04 | 4,33E-05 | 1,15E-03 | 5,89E-03 | 5,89E-03 | 1,15E-03 | 4,33E-05 | 3,03E-02 | 3,03E-02 | 5,89E-03 | 3,03E-02 |
| 270 | 0,5 | 7,29E-03 | 2,45E-02 | 8,04E-03 | 2,45E-02 | 2,45E-02 | 8,04E-03 | 8,04E-03 | 2,06E-02 | 2,06E-02 | 8,04E-03 | 8,04E-03 | 2,06E-02 | 2,06E-02 | 8,04E-03 | 1,23E-03 | 8,04E-03 | 8,04E-03 | 3,14E-03 | 1,23E-03 |
| 270 | 0,5 | 1,31E-10 | 1,28E-06 | 1,28E-06 | 4,84E-02 | 4,84E-02 | 4,84E-02 | 1,02E-10 | 7,60E-05 | 7,60E-05 | 8,78E-08 | 7,60E-05 | 6,57E-02 | 6,57E-02 | 7,60E-05 | 1,02E-10 | 6,57E-02 | 6,57E-02 | 7,60E-05 | 7,60E-05 |
| 270 | 1 | 2,04E-08 | 1,50E-09 | 1,29E-08 | 2,19E-09 | 3,26E-10 | 2,82E-09 | 1,12E-10 | 1,08E-09 | 1,77E-10 | 2,57E-11 | 8,34E-09 | 1,52E-09 | 2,48E-10 | 3,61E-11 | 4,69E-12 | 1,91E-09 | 3,11E-10 | 4,53E-11 | 3,49E-10 |
| 270 | 1 | 9,31E-09 | 2,02E-09 | 6,82E-09 | 1,74E-09 | 4,09E-10 | 1,38E-09 | 4,27E-10 | 1,60E-09 | 3,99E-10 | 9,28E-11 | 5,20E-09 | 1,39E-09 | 3,47E-10 | 8,08E-11 | 1,76E-11 | 1,13E-09 | 2,82E-10 | 6,56E-11 | 2,13E-10 |
| 270 | 1 | 9,51E-08 | 7,62E-09 | 5,35E-08 | 7,62E-09 | 9,22E-10 | 6,47E-09 | 5,71E-10 | 4,88E-09 | 6,59E-10 | 7,70E-11 | 3,13E-08 | 4,88E-09 | 6,59E-10 | 7,70E-11 | 7,81E-12 | 4,23E-09 | 5,71E-10 | 6,68E-11 | 4,29E-10 |
| 270 | 1 | 5,74E-08 | 6,64E-09 | 3,39E-08 | 7,36E-09 | 1,44E-09 | 7,36E-09 | 7,34E-10 | 4,22E-09 | 8,82E-10 | 1,68E-10 | 2,02E-08 | 4,63E-09 | 9,68E-10 | 1,84E-10 | 3,20E-11 | 4,63E-09 | 9,68E-10 | 1,84E-10 | 8,82E-10 |
| 270 | 1 | 1,14E-07 | 1,67E-08 | 6,74E-08 | 1,29E-08 | 2,19E-09 | 8,85E-09 | 2,14E-09 | 1,05E-08 | 1,91E-09 | 3,11E-10 | 4,08E-08 | 8,34E-09 | 1,52E-09 | 2,48E-10 | 3,61E-11 | 5,94E-09 | 1,08E-09 | 1,77E-10 | 6,88E-10 |
| 270 | 1 | 1,96E-07 | 1,33E-08 | 1,14E-07 | 2,04E-08 | 3,18E-09 | 2,72E-08 | 9,01E-10 | 8,85E-09 | 1,50E-09 | 2,23E-10 | 6,74E-08 | 1,29E-08 | 2,19E-09 | 3,26E-10 | 4,28E-11 | 1,67E-08 | 2,82E-09 | 4,20E-10 | 3,20E-09 |
| 270 | 1 | 1,63E-06 | 2,22E-07 | 8,83E-07 | 2,67E-07 | 7,34E-08 | 2,92E-07 | 2,76E-08 | 1,24E-07 | 3,55E-08 | 9,31E-09 | 4,74E-07 | 1,47E-07 | 4,20E-08 | 1,10E-08 | 2,66E-09 | 1,60E-07 | 4,56E-08 | 1,20E-08 | 4,56E-08 |
| 270 | 1 | 6,54E-06 | 5,89E-07 | 2,61E-06 | 4,89E-07 | 7,90E-08 | 3,37E-07 | 5,16E-08 | 3,08E-07 | 5,16E-08 | 7,62E-09 | 1,33E-06 | 2,62E-07 | 4,39E-08 | 6,47E-09 | 7,84E-10 | 1,89E-07 | 3,17E-08 | 4,51E-09 | 1,95E-08 |
| 270 | 1 | 2,56E-05 | 3,05E-06 | 1,27E-05 | 3,52E-06 | 8,41E-07 | 3,52E-06 | 3,09E-07 | 1,61E-06 | 3,99E-07 | 8,69E-08 | 6,51E-06 | 1,83E-06 | 4,53E-07 | 9,87E-08 | 1,90E-08 | 1,83E-06 | 4,53E-07 | 9,87E-08 | 3,99E-07 |
| 270 | 1 | 7,19E-05 | 1,20E-05 | 3,04E-05 | 8,27E-06 | 1,87E-06 | 4,73E-06 | 1,62E-06 | 5,94E-06 | 1,38E-06 | 2,72E-07 | 1,58E-05 | 4,30E-06 | 9,96E-07 | 1,96E-07 | 3,29E-08 | 2,64E-06 | 6,12E-07 | 1,21E-07 | 3,19E-07 |
| 270 | 1 | 2,79E-04 | 2,31E-05 | 1,03E-04 | 2,31E-05 | 4,01E-06 | 1,80E-05 | 1,22E-06 | 8,42E-06 | 1,51E-06 | 2,20E-07 | 3,78E-05 | 8,42E-06 | 1,51E-06 | 2,20E-07 | 2,57E-08 | 6,79E-06 | 1,22E-06 | 1,77E-07 | 7,95E-07 |
| 270 | 1 | 4,96E-05 | 7,53E-06 | 2,62E-05 | 9,44E-06 | 3,04E-06 | 1,06E-05 | 9,81E-07 | 4,09E-06 | 1,33E-06 | 3,92E-07 | 1,39E-05 | 5,01E-06 | 1,63E-06 | 4,80E-07 | 1,28E-07 | 5,55E-06 | 1,81E-06 | 5,32E-07 | 1,81E-06 |
| 270 | 1 | 1,95E-03 | 1,29E-04 | 7,49E-04 | 1,83E-04 | 3,14E-05 | 1,83E-04 | 4,52E-06 | 4,77E-05 | 8,15E-06 | 1,04E-06 | 2,79E-04 | 6,40E-05 | 1,09E-05 | 1,39E-06 | 1,32E-07 | 6,40E-05 | 1,09E-05 | 1,39E-06 | 8,15E-06 |
| 270 | 1 | 1,84E-03 | 1,24E-03 | 1,24E-03 | 4,27E-04 | 8,65E-05 | 8,65E-05 | 9,66E-05 | 3,50E-04 | 6,29E-05 | 7,36E-06 | 5,38E-04 | 1,48E-04 | 2,67E-05 | 3,12E-06 | 2,38E-07 | 4,10E-05 | 7,36E-06 | 8,61E-07 | 1,32E-06 |
| 270 | 1 | 7,77E-04 | 1,67E-04 | 4,56E-04 | 2,23E-04 | 9,45E-05 | 2,57E-04 | 2,63E-05 | 9,36E-05 | 3,85E-05 | 1,39E-05 | 2,58E-04 | 1,21E-04 | 4,96E-05 | 1,80E-05 | 5,73E-06 | 1,37E-04 | 5,63E-05 | 2,04E-05 | 5,63E-05 |
| 270 | 1 | 1,87E-14 | 9,48E-09 | 1,25E-09 | 7,21E-08 | 2,12E-06 | 2,79E-07 | 2,09E-06 | 2,09E-06 | 1,75E-05 | 8,65E-05 | 7,20E-07 | 1,03E-05 | 8,65E-05 | 4,27E-04 | 1,24E-03 | 2,98E-05 | 2,51E-04 | 1,24E-03 | 4,27E-04 |
| 270 | 1 | 1,18E-08 | 2,21E-05 | 1,32E-06 | 1,09E-05 | 6,36E-05 | 3,79E-06 | 9,06E-04 | 2,08E-04 | 6,75E-04 | 1,63E-03 | 2,65E-05 | 1,15E-04 | 3,75E-04 | 9,06E-04 | 1,63E-03 | 4,77E-05 | 1,55E-04 | 3,75E-04 | 4,77E-05 |
| 270 | 1 | 1,04E-15 | 5,41E-06 | 3,79E-09 | 4,80E-07 | 1,81E-05 | 1,27E-08 | 7,07E-03 | 4,92E-04 | 2,91E-03 | 7,07E-03 | 5,78E-06 | 8,32E-05 | 4,92E-04 | 1,20E-03 | 1,20E-03 | 5,78E-06 | 3,42E-05 | 8,32E-05 | 9,78E-07 |
| 270 | 1 | 1,81E-05 | 8,32E-05 | 4,92E-04 | 1,20E-03 | 1,20E-03 | 7,07E-03 | 8,21E-06 | 2,42E-04 | 1,23E-04 | 3,18E-05 | 1,84E-03 | 1,84E-03 | 9,35E-04 | 2,42E-04 | 3,18E-05 | 7,12E-03 | 3,62E-03 | 9,35E-04 | 7,12E-03 |
| 270 | 1 | 5,38E-04 | 4,36E-03 | 1,52E-03 | 2,16E-03 | 2,16E-03 | 7,49E-04 | 3,95E-03 | 3,95E-03 | 2,94E-03 | 1,63E-03 | 2,19E-03 | 2,19E-03 | 1,63E-03 | 9,06E-04 | 3,75E-04 | 9,06E-04 | 6,75E-04 | 3,75E-04 | 2,08E-04 |

| w, град. | u, м/с | C7 (t-2) | C3 (t-1) | C6 (t-1) | C7 (t-1) | C8 (t-1) | C11 (t-1) | C1 (t) | C2 (t) | C3 (t) | C4 (t) | C5 (t) | C6 (t) | C7 (t) | C8 (t) | C9 (t) | C10 (t) | C11 (t) | C12 (t) | C13 (t) |
|----------|--------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 270 | 1 | 3,75E-04 | 2,65E-03 | 9,77E-04 | 1,61E-03 | 2,07E-03 | 7,61E-04 | 3,42E-03 | 2,76E-03 | 2,76E-03 | 2,23E-03 | 1,45E-03 | 1,80E-03 | 1,80E-03 | 1,45E-03 | 9,44E-04 | 9,44E-04 | 9,44E-04 | 7,61E-04 | 4,00E-04 |
| 270 | 1 | 1,46E-07 | 6,29E-05 | 1,13E-05 | 9,66E-05 | 5,38E-04 | 9,66E-05 | 7,49E-04 | 5,27E-04 | 1,52E-03 | 3,07E-03 | 1,83E-04 | 7,49E-04 | 2,16E-03 | 4,36E-03 | 6,20E-03 | 7,49E-04 | 2,16E-03 | 4,36E-03 | 1,52E-03 |
| 270 | 1 | 7,79E-06 | 2,00E-03 | 2,38E-04 | 1,18E-03 | 3,58E-03 | 4,06E-04 | 6,74E-03 | 4,39E-03 | 6,74E-03 | 7,06E-03 | 1,21E-03 | 2,86E-03 | 4,39E-03 | 4,60E-03 | 2,99E-03 | 1,21E-03 | 1,86E-03 | 1,86E-03 | 5,13E-04 |
| 270 | 1 | 2,80E-08 | 2,42E-04 | 1,62E-05 | 2,42E-04 | 1,84E-03 | 1,23E-04 | 3,58E-03 | 2,11E-03 | 6,10E-03 | 1,04E-02 | 4,27E-04 | 2,11E-03 | 6,10E-03 | 1,04E-02 | 1,04E-02 | 1,24E-03 | 3,58E-03 | 6,10E-03 | 1,24E-03 |
| 270 | 2 | 5,50E-07 | 8,05E-09 | 4,19E-08 | 9,78E-09 | 2,07E-09 | 1,08E-08 | 1,16E-10 | 7,01E-10 | 1,48E-10 | 2,89E-11 | 3,60E-09 | 8,26E-10 | 1,75E-10 | 3,40E-11 | 6,12E-12 | 8,96E-10 | 1,90E-10 | 3,69E-11 | 1,90E-10 |
| 270 | 2 | 1,68E-05 | 1,30E-07 | 7,31E-07 | 1,50E-07 | 2,65E-08 | 1,50E-07 | 7,81E-10 | 5,72E-09 | 9,87E-10 | 1,52E-10 | 3,31E-08 | 6,43E-09 | 1,11E-09 | 1,70E-10 | 2,33E-11 | 6,43E-09 | 1,11E-09 | 1,70E-10 | 9,87E-10 |
| 270 | 2 | 2,18E-04 | 6,79E-07 | 4,52E-06 | 6,79E-07 | 8,05E-08 | 5,36E-07 | 1,56E-09 | 1,66E-08 | 1,87E-09 | 1,76E-10 | 1,23E-07 | 1,66E-08 | 1,87E-09 | 1,76E-10 | 1,37E-11 | 1,39E-08 | 1,56E-09 | 1,46E-10 | 1,08E-09 |
| 270 | 2 | 2,80E-05 | 1,65E-06 | 3,75E-06 | 1,41E-06 | 4,86E-07 | 1,10E-06 | 6,62E-08 | 1,89E-07 | 6,17E-08 | 1,88E-08 | 4,67E-07 | 1,64E-07 | 5,37E-08 | 1,64E-08 | 4,67E-09 | 1,33E-07 | 4,35E-08 | 1,33E-08 | 3,29E-08 |
| 270 | 2 | 7,83E-04 | 5,73E-06 | 4,84E-05 | 1,17E-05 | 2,22E-06 | 1,88E-05 | 2,00E-08 | 2,55E-07 | 4,14E-08 | 5,58E-09 | 2,27E-06 | 4,41E-07 | 7,14E-08 | 9,64E-09 | 1,08E-09 | 6,35E-07 | 1,03E-07 | 1,39E-08 | 1,23E-07 |
| 270 | 2 | 8,10E-03 | 2,18E-04 | 7,83E-04 | 2,18E-04 | 4,39E-05 | 1,58E-04 | 5,36E-07 | 4,52E-06 | 6,79E-07 | 8,05E-08 | 2,38E-05 | 4,52E-06 | 6,79E-07 | 8,05E-08 | 7,52E-09 | 3,57E-06 | 5,36E-07 | 6,35E-08 | 3,34E-07 |
| 270 | 2 | 1,32E-03 | 1,07E-04 | 2,43E-04 | 1,20E-04 | 5,30E-05 | 1,20E-04 | 4,42E-06 | 1,42E-05 | 5,37E-06 | 1,85E-06 | 3,74E-05 | 1,56E-05 | 5,92E-06 | 2,04E-06 | 6,35E-07 | 1,56E-05 | 5,92E-06 | 2,04E-06 | 5,37E-06 |
| 270 | 2 | 1,69E-03 | 3,72E-04 | 5,35E-04 | 2,58E-04 | 1,04E-04 | 1,49E-04 | 1,13E-05 | 3,11E-05 | 9,81E-06 | 2,68E-06 | 6,39E-05 | 2,33E-05 | 7,35E-06 | 2,01E-06 | 4,74E-07 | 1,51E-05 | 4,77E-06 | 1,30E-06 | 2,68E-06 |
| 270 | 2 | 6,88E-04 | 9,86E-05 | 1,90E-04 | 1,07E-04 | 5,57E-05 | 1,07E-04 | 7,11E-06 | 1,76E-05 | 8,18E-06 | 3,54E-06 | 3,80E-05 | 1,89E-05 | 8,77E-06 | 3,79E-06 | 1,53E-06 | 1,89E-05 | 8,77E-06 | 3,79E-06 | 8,18E-06 |
| 270 | 2 | 1,31E-03 | 3,00E-04 | 1,49E-03 | 7,83E-04 | 3,00E-04 | 1,49E-03 | 2,22E-06 | 2,38E-05 | 5,73E-06 | 1,09E-06 | 1,58E-04 | 4,84E-05 | 1,17E-05 | 2,22E-06 | 3,34E-07 | 7,77E-05 | 1,88E-05 | 3,57E-06 | 2,38E-05 |
| 270 | 2 | 6,96E-04 | 3,49E-04 | 3,84E-04 | 2,61E-04 | 1,61E-04 | 1,77E-04 | 5,13E-05 | 8,38E-05 | 4,36E-05 | 2,09E-05 | 1,16E-04 | 6,55E-05 | 3,41E-05 | 1,63E-05 | 7,21E-06 | 4,73E-05 | 2,46E-05 | 1,18E-05 | 1,63E-05 |
| 270 | 2 | 5,29E-04 | 2,82E-03 | 2,05E-03 | 1,49E-03 | 7,83E-04 | 5,69E-04 | 9,85E-05 | 2,54E-04 | 7,77E-05 | 1,88E-05 | 4,08E-04 | 1,58E-04 | 4,84E-05 | 1,17E-05 | 2,22E-06 | 7,77E-05 | 2,38E-05 | 5,73E-06 | 9,21E-06 |
| 270 | 2 | 2,08E-04 | 8,10E-03 | 8,10E-03 | 8,10E-03 | 5,14E-03 | 5,14E-03 | 1,58E-04 | 7,83E-04 | 2,18E-04 | 4,39E-05 | 2,05E-03 | 7,83E-04 | 2,18E-04 | 4,39E-05 | 6,43E-06 | 5,68E-04 | 1,58E-04 | 3,19E-05 | 8,33E-05 |
| 270 | 2 | 5,35E-04 | 1,76E-03 | 1,32E-03 | 1,32E-03 | 1,14E-03 | 8,58E-04 | 4,36E-04 | 6,19E-04 | 3,88E-04 | 2,16E-04 | 6,96E-04 | 4,90E-04 | 3,07E-04 | 1,71E-04 | 8,46E-05 | 3,45E-04 | 2,16E-04 | 1,20E-04 | 1,35E-04 |
| 270 | 2 | 1,34E-10 | 9,74E-06 | 1,31E-06 | 5,64E-06 | 2,02E-05 | 2,72E-06 | 7,42E-04 | 3,12E-04 | 5,56E-04 | 8,58E-04 | 9,86E-05 | 2,03E-04 | 3,61E-04 | 5,56E-04 | 7,42E-04 | 1,14E-04 | 2,03E-04 | 3,12E-04 | 9,86E-05 |
| 270 | 2 | 3,23E-11 | 3,27E-06 | 7,61E-07 | 3,92E-06 | 1,68E-05 | 3,92E-06 | 3,12E-04 | 2,03E-04 | 4,17E-04 | 7,42E-04 | 9,86E-05 | 2,34E-04 | 4,82E-04 | 8,58E-04 | 1,32E-03 | 2,34E-04 | 4,82E-04 | 8,58E-04 | 4,17E-04 |
| 270 | 2 | 1,58E-04 | 1,69E-03 | 2,15E-03 | 2,72E-03 | 2,72E-03 | 3,45E-03 | 3,10E-04 | 9,23E-04 | 5,35E-04 | 2,58E-04 | 1,91E-03 | 1,33E-03 | 7,70E-04 | 3,72E-04 | 1,49E-04 | 1,59E-03 | 9,23E-04 | 4,46E-04 | 9,23E-04 |
| 270 | 2 | 4,00E-10 | 8,33E-05 | 3,19E-05 | 1,58E-04 | 5,69E-04 | 2,18E-04 | 8,32E-04 | 1,34E-03 | 1,69E-03 | 1,69E-03 | 1,34E-03 | 2,15E-03 | 2,72E-03 | 2,72E-03 | 2,15E-03 | 2,72E-03 | 3,45E-03 | 3,45E-03 | 3,45E-03 |
| 270 | 5 | 3,42E-07 | 8,49E-09 | 1,35E-08 | 8,27E-09 | 5,01E-09 | 7,96E-09 | 1,59E-10 | 2,70E-10 | 1,57E-10 | 9,00E-11 | 4,50E-10 | 2,64E-10 | 1,53E-10 | 8,80E-11 | 4,99E-11 | 2,55E-10 | 1,48E-10 | 8,50E-11 | 1,42E-10 |
| 270 | 5 | 2,17E-06 | 5,95E-08 | 9,38E-08 | 5,87E-08 | 3,61E-08 | 5,70E-08 | 1,07E-09 | 1,84E-09 | 1,07E-09 | 6,18E-10 | 3,08E-09 | 1,82E-09 | 1,06E-09 | 6,10E-10 | 3,47E-10 | 1,77E-09 | 1,03E-09 | 5,95E-10 | 9,94E-10 |
| 270 | 5 | 2,31E-06 | 8,56E-08 | 1,27E-07 | 8,34E-08 | 5,39E-08 | 8,03E-08 | 2,15E-09 | 3,47E-09 | 2,13E-09 | 1,29E-09 | 5,46E-09 | 3,39E-09 | 2,08E-09 | 1,26E-09 | 7,59E-10 | 3,28E-09 | 2,01E-09 | 1,22E-09 | 1,92E-09 |
| 270 | 5 | 4,49E-06 | 1,44E-07 | 2,30E-07 | 1,48E-07 | 9,38E-08 | 1,50E-07 | 2,89E-09 | 5,01E-09 | 3,00E-09 | 1,77E-09 | 8,49E-09 | 5,14E-09 | 3,08E-09 | 1,82E-09 | 1,06E-09 | 5,21E-09 | 3,12E-09 | 1,84E-09 | 3,12E-09 |
| 270 | 5 | 8,34E-06 | 2,60E-07 | 3,97E-07 | 2,51E-07 | 1,56E-07 | 2,39E-07 | 4,56E-09 | 7,73E-09 | 4,49E-09 | 2,57E-09 | 1,27E-08 | 7,51E-09 | 4,36E-09 | 2,49E-09 | 1,41E-09 | 7,18E-09 | 4,17E-09 | 2,39E-09 | 3,93E-09 |
| 270 | 5 | 8,42E-06 | 3,52E-07 | 5,15E-07 | 3,42E-07 | 2,23E-07 | 3,27E-07 | 8,60E-09 | 1,38E-08 | 8,49E-09 | 5,14E-09 | 2,17E-08 | 1,35E-08 | 8,27E-09 | 5,01E-09 | 3,00E-09 | 1,30E-08 | 7,96E-09 | 4,82E-09 | 7,56E-09 |
| 270 | 5 | 6,35E-06 | 2,97E-07 | 4,37E-07 | 2,97E-07 | 2,00E-07 | 2,94E-07 | 8,89E-09 | 1,42E-08 | 8,99E-09 | 5,65E-09 | 2,20E-08 | 1,42E-08 | 8,99E-09 | 5,65E-09 | 3,51E-09 | 1,40E-08 | 8,89E-09 | 5,58E-09 | 8,69E-09 |

| w, град. | u, м/с | C7 (t-2) | C3 (t-1) | C6 (t-1) | C7 (t-1) | C8 (t-1) | C11 (t-1) | C1 (t) | C2 (t) | C3 (t) | C4 (t) | C5 (t) | C6 (t) | C7 (t) | C8 (t) | C9 (t) | C10 (t) | C11 (t) | C12 (t) | C13 (t) |
|-------------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 270 | 5 | 1,60E-05 | 7,89E-07 | 1,17E-06 | 8,01E-07 | 5,39E-07 | 8,01E-07 | 2,17E-08 | 2,22E-08 | 2,22E-08 | 1, 38E-08 | 5,60E-08 | 3,57E-08 | 2,25E-08 | 1,40E-08 | 8,60E-09 | 3,57E-08 | 2,25E-08 | 1,40E-08 | 2,22E-08 |
| 270 | 5 | 6,04E-05 | 4,34E-06 | 6,31E-06 | 4,49E-06 | 3,15E-06 | 4,57E-06 | 1,37E-07 | 2,23E-07 | 1,44E-07 | 9,11E-08 | 3,52E-07 | 2,30E-07 | 1,48E-07 | 9,38E-08 | 5,87E-08 | 2,33E-07 | 1,50E-07 | 9,52E-08 | 1,50E-07 |
| 270 | 5 | 8,23E-05 | 5,50E-06 | 8,34E-06 | 5,84E-06 | 4,01E-06 | 6,07E-06 | 1,39E-07 | 2,39E-07 | 1,49E-07 | 9,09E-08 | 3,97E-07 | 2,51E-07 | 1,56E-07 | 9,56E-08 | 5,75E-08 | 2,60E-07 | 1,62E-07 | 9,89E-08 | 1,65E-07 |
| 270 | 5 | 8,46E-05 | 8,71E-06 | 1,14E-05 | 8,42E-06 | 6,10E-06 | 8,00E-06 | 3,57E-07 | 5,31E-07 | 3,52E-07 | 2,30E-07 | 7,66E-07 | 5,15E-07 | 3,42E-07 | 2,23E-07 | 1,44E-07 | 4,93E-07 | 3,27E-07 | 2,14E-07 | 3,08E-07 |
| 270 | 5 | 1,87E-04 | 3,91E-05 | 4,86E-05 | 3,83E-05 | 2,96E-05 | 3,68E-05 | 2,20E-06 | 3,20E-06 | 2,20E-06 | 1,49E-06 | 4,49E-06 | 3,15E-06 | 2,17E-06 | 1,47E-06 | 9,76E-07 | 3,04E-06 | 2,09E-06 | 1,42E-06 | 1,99E-06 |
| 270 | 5 | 1,53E-04 | 3,38E-05 | 4,08E-05 | 3,27E-05 | 2,58E-05 | 3,11E-05 | 2,41E-06 | 3,33E-06 | 2,37E-06 | 1,67E-06 | 4,46E-06 | 3,23E-06 | 2,31E-06 | 1,62E-06 | 1,12E-06 | 3,09E-06 | 2,21E-06 | 1,55E-06 | 2,08E-06 |
| 270 | 5 | 1,83E-04 | 6,33E-05 | 7,51E-05 | 6,33E-05 | 5,26E-05 | 6,23E-05 | 6,26E-06 | 8,52E-06 | 6,35E-06 | 4,67E-06 | 1,13E-05 | 8,52E-06 | 6,35E-06 | 4,67E-06 | 3,38E-06 | 8,40E-06 | 6,26E-06 | 4,60E-06 | 6,08E-06 |
| 270 | 5 | 2,09E-04 | 1,41E-04 | 1,62E-04 | 1,45E-04 | 1,26E-04 | 1,45E-04 | 1,60E-05 | 2,24E-05 | 1,67E-05 | 1,21E-05 | 3,02E-05 | 2,29E-05 | 1,70E-05 | 1,24E-05 | 8,85E-06 | 2,29E-05 | 1,70E-05 | 1,24E-05 | 1,67E-05 |
| 270 | 5 | 1,18E-17 | 4,79E-09 | 1,56E-09 | 4,38E-09 | 1,18E-08 | 3,83E-09 | 2,30E-05 | 1,40E-05 | 2,22E-05 | 3,39E-05 | 7,96E-06 | 1,30E-05 | 2,06E-05 | 3,15E-05 | 4,65E-05 | 1,17E-05 | 1,86E-05 | 2,84E-05 | 1,61E-05 |
| 270 | 5 | 4,77E-15 | 2,04E-08 | 9,04E-09 | 2,11E-08 | 4,75E-08 | 2,11E-08 | 1,92E-05 | 2,03E-05 | 2,03E-05 | 2,94E-05 | 9,16E-06 | 1,40E-05 | 2,09E-05 | 3,02E-05 | 4,25E-05 | 1,40E-05 | 2,09E-05 | 3,02E-05 | 2,03E-05 |
| 270 | 5 | 7,15E-05 | 1,83E-04 | 1,83E-04 | 1,83E-04 | 1,80E-04 | 1,80E-04 | 6,23E-05 | 7,51E-05 | 6,33E-05 | 5,26E-05 | 8,74E-05 | 7,51E-05 | 6,33E-05 | 5,26E-05 | 4,29E-05 | 7,38E-05 | 6,23E-05 | 5,17E-05 | 6,02E-05 |
| 270 | 5 | 5,33E-06 | 1,23E-04 | 9,93E-05 | 1,17E-04 | 1,35E-04 | 1,09E-04 | 1,63E-04 | 1,69E-04 | 1,59E-04 | 1,47E-04 | 1,69E-04 | 1,63E-04 | 1,53E-04 | 1,42E-04 | 1,28E-04 | 1,53E-04 | 1,44E-04 | 1,33E-04 | 1,33E-04 |
| 270 | 5 | 1,57E-06 | 1,25E-04 | 9,70E-05 | 1,22E-04 | 1,49E-04 | 1,15E-04 | 1,91E-04 | 2,01E-04 | 1,91E-04 | 1,78E-04 | 2,01E-04 | 1,96E-04 | 1,87E-04 | 1,74E-04 | 1,59E-04 | 1,87E-04 | 1,78E-04 | 1,66E-04 | 1,66E-04 |
| 270 | 5 | 1,18E-08 | 2,84E-05 | 2,06E-05 | 3,15E-05 | 4,65E-05 | 3,39E-05 | 2,03E-04 | 2,15E-04 | 2,28E-04 | 2,34E-04 | 2,15E-04 | 2,34E-04 | 2,48E-04 | 2,55E-04 | 2,55E-04 | 2,48E-04 | 2,63E-04 | 2,70E-04 | 2,70E-04 |

Приложение 2. Акт об использовании компьютерной системы ячеечно-нейросетевого моделирования для анализа последствий аварий с выбросом опасных химических веществ



ПРИВЕРЖДАЮ

Глава администрации
муниципального образования
города Новомосковск

В.А. Жерздев

В.А. Жерздев
октябрь 2016 г.

АКТ

об использовании компьютерной системы ячейечно-нейросетевого моделирования для анализа последствий аварий с выбросом опасных химических веществ

Настоящий акт свидетельствует о том, что компьютерная система ячейечно-нейросетевого моделирования для анализа последствий аварий с выбросом опасных химических веществ, разработанная в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева» (ФГБОУ ВО «РХТУ им. Д. И. Менделеева») доцентом кафедры информационных компьютерных технологий (ИКТ) Дударовым Сергеем Павловичем и аспирантом кафедры ИКТ Папаевым Павлом Леонидовичем была изучена и использована в «Управлении обеспечения безопасности населения, гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций муниципального образования город Новомосковск» для решения ряда задач экологической безопасности, связанных с загрязнением атмосферы источниками промышленных предприятий г. Новомосковска Тульской области.

В ходе работы проведены установка, опытная эксплуатация и тестирование функций системы. Были решены следующие практические задачи:

- расчет пространственных и временных профилей концентрации опасных химических веществ (аммиака, хлора), зон загрязнения и уровней токсического поражения на примере возможных аварийных выбросов на территории АО «Новомосковская акционерная компания «Азот» и ООО «Новомосковский хлор»;

- оценка и анализ возможных последствий загрязнения аварийными источниками при заданном сценарии изменения метеоусловий территории городского округа Новомосковск;

- восстановление профилей концентрации и зон загрязнения по имеющейся неполной информации, полученной в результате наблюдений на 4 стационарных постах АСК «Атмосфера» г. Новомосковска за динамикой концентрации 6 загрязняющих веществ.

Отличительные особенности компьютерной системы, такие, как использование многослойных перцептронов для математического описания переноса примеси, возможность оперативной оценки последствий аварий на основе неполной исходной информации, возможность задания сценария изменения метеоусловий, повышают оперативность и эффективность принятия решений по обеспечению экологической и промышленной безопасности. Таким образом, использованная компьютерная система ячейечно-нейросетевого моделирования для анализа последствий аварий с выбросом опасных химических веществ может быть рекомендована в качестве эффективного инструмента к использованию экологическими службами предприятий, территориальными организациями мониторинга атмосферы, научно-исследовательскими и учебно-исследовательскими центрами.

Заместитель начальника
управления обеспечения безопасности
населения, гражданской обороны
и чрезвычайных ситуаций
администрации муниципального образования
город Новомосковск

А.М. Степанов
А.М. Степанов

Приложение 3. Письмо ООО «УралПромБезопасность»



УРАЛПРОМБЕЗОПАСНОСТЬ
ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ



614013, Россия, г. Пермь, ул. Академика Королева, 4, тел/факс: +7 (342) 237-80-21
Лицензия Ростехнадзора № 00-ДЭ-003170 от 06.05.2009 г.

Настоящим письмом ООО «УралПромБезопасность» подтверждает, что результаты научных исследований С. П. Дударова, П. Л. Папаева по разработке теоретических основ ячеечно-нейросетевого моделирования, моделей, алгоритмов и информационно-программного обеспечения для анализа последствий аварийного загрязнения атмосферы промышленными источниками, были внедрены и использованы для анализа и количественной оценки последствий аварийных выбросов при проведении экспертизы промышленной безопасности опасных производственных объектов в период с 2012 по 2016 гг.

В частности, информационно-моделирующая система использовалась для:

- оценки размеров возможных зон загрязнения и токсического поражения при постоянных метеоусловиях и при заданном сценарии изменения метеоусловий;
- разработки планов мероприятий по локализации аварий и ликвидации их последствий на опасных производственных объектах.

Разработанные теоретические основы, модели и алгоритмы, реализованные в информационно-программном обеспечении, совершенствуют имеющуюся научно-методическую базу и позволяют повысить эффективность мероприятий при проведении экспертизы промышленной безопасности.

Технический директор



Handwritten signature and date: 10.2016

Мошев Е.Р.

Приложение 4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2012616901

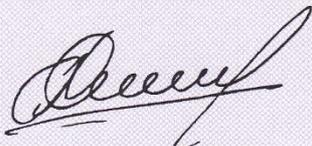
Информационная система ячеечно-нейросетевого моделирования последствий загрязнения атмосферы типовыми промышленными источниками выбросов

Правообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» (РХТУ им. Д.И. Менделеева) (RU)*

Автор(ы): *Папаев Павел Леонидович, Дударов Сергей Павлович (RU)*

Заявка № **2012614622**
Дата поступления **7 июня 2012 г.**
Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ **2 августа 2012 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности



Б.П. Симонов

Приложение 5. Основные фрагменты исходного кода информационной системы «ЯНСКА»

```
{<<<МАТРИЦА СЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ ОТ -0.3 ДО 0.3>>>}
function func1(LCount: byte; Neuron: Tarray1b): Tarray3r;
var i, j, k: word;
begin
  SetLength(result, LCount);
  //Матрица весовых коэф.
  For i:=0 to LCount-1 do
    SetLength(result[i], Neuron[i]+1, Neuron[i+1]);
  For k:=0 to LCount-1 do
  //№ слоя
    For i:=0 to Neuron[k+1]-1 do
  //Кол-во нейронов слева
      For j:=0 to Neuron[k] do
  //Кол-во нейронов справа
        result[k, j, i]:=(Random(7))/10-0.3;
  //Весовые коэф. рандомом
end;

{<<<ПОИСК МАХ ЗНАЧЕНИЯ>>>}
function func2(a, b: real):real;
begin
  if a>b then result:=a else result:=b;
end;

{<<<ПОИСК MIN ЗНАЧЕНИЯ>>>}
function func3(a, b: real):real;
begin
  if a<b then result:=a else result:=b;
end;

{<<<НОРМИРОВАНИЕ ДАННЫХ>>>}
function func4(A, Amax, Amin: real):real;
begin
  result:=(A-Amin)/(Amax-Amin);
end;

{<<<МАССИВ ИНДЕКСОВ РАНДОМОМ>>>}
function func5(RowCount: integer): Tarray1w;
label la;
var i, j: word;
begin
  for j:=0 to RowCount-2 do
    result[j]:=10000;
  for j:=0 to RowCount-2 do begin
    la: result[j]:=Random(RowCount-1);
    for i:=0 to RowCount-2 do
      if i<>j then
```

```

        if result[j]=result[i] then goto la;
    end;
end;

{<<<ПРЯМОЙ ПРОХОД>>>}
function func6(Neuron: Tarray1b; LCount: byte; W: Tarray3r; alpha: real; net:Tarray2r):Tarray2r;
label la;
var i, k, j: word;
begin
    if result<>net then begin
        SetLength(result, LCount+1);
        for i:=0 to LCount do
            SetLength(result[i], Neuron[i]);
        for i:=0 to Neuron[0]-1 do
            result[0, i]:=net[0, i];
        la: for k:=1 to LCount do
//№ слоя
            for i:=0 to Neuron[k]-1 do begin
//Кол-во нейронов справа
                result[k, i]:=W[k-1, 0, i];
                for j:=1 to Neuron[k-1] do
//Кол-во нейронов слева
                    result[k, i]:=result[k, i]+result[k-1, j-1]*W[k-1, j, i];
                    result[k, i]:=1/(1+exp(-alpha*result[k, i]));
                end;
            end else goto la;
        end;
end;

{<<<ОБРАТНЫЙ ПРОХОД & НОВЫЕ ВЕСОВЫЕ КОЭФ.>>>}
function func7(Neuron: Tarray1b; LCount: byte; Y, net: Tarray2r; a: Tarray1w;
kp: word; W: Tarray3r; n:real):Tarray3r;
label la;
var Sigma: Tarray2r;
    i, j, k: word;
begin
    if result<>W then begin
        SetLength(result, LCount);
//Матрица весовых коэф.
        For i:=0 to LCount-1 do
            SetLength(result[i], Neuron[i]+1, Neuron[i+1]);
        la: SetLength(Sigma, LCount);
//Матрица ошибок
        for i:=0 to LCount do
            if i<>LCount then
                SetLength(Sigma[i], Neuron[i+1]);
{ОБРАТНЫЙ ПРОХОД}
{Внешний слой}
        for k:=0 to Neuron[LCount]-1 do
//Кол-во нейронов в выходном слое
            Sigma[LCount-1, k]:= (Y[a[kp], k]-net[LCount, k])*alpha*net[LCount, k]*(1-
```

```

net[LCount, k]);
{Скрытые слои}
  for k:=LCount-1 downto 1 do
//№ слоя
  for i:=0 to Neuron[k]-1 do begin
//Кол-во нейронов слева
  Sigma[k-1, i]:=0;
  for j:=0 to Neuron[k+1]-1 do
//Кол-во нейронов справа
  Sigma[k-1, i]:=Sigma[k-1, i]+alpha*net[k, i]*(1-net[k, i])*Sigma[k,
j]*W[k, i+1, j];
  end;
{НОВЫЕ ВЕСОВЫЕ КОЭФ.}
  for k:=0 to LCount-1 do
//№ слоя
  for i:=0 to Neuron[k+1]-1 do
//Кол-во нейронов слева
  for j:=0 to Neuron[k] do
//Кол-во нейронов справа
  if j=0 then result[k, j, i]:=W[k, j, i]+n*Sigma[k, i]
  else result[k, j, i]:=W[k, j, i]+n*Sigma[k, i]*net[k, j-1];
  end else goto la;
end;

{<<<ДЕНОРМИРОВАНИЕ>>>}
function func8(kp, i: word; net: Tarray2r; LCount: byte;
Ymax, Ymin: Tarray1r):Tarray2r;
begin
  result[kp, i]:=net[LCount, i]*(Ymax[i]-Ymin[i])+Ymin[i];
end;

{<<<ЗАГРУЗКА МОДЕЛИ>>>}
procedure procl (var NN: Tnn);
var tf: textfile;
  i, j, k: byte;
begin
  if not Form1.OpenDialog1.Execute then
    exit;
  AssignFile(tf, Form1.OpenDialog1.FileName);
  reset(tf);
  readln (tf, NN.s);
  readln (tf, NN.LCount);
//Кол-во слоев
  SetLength (NN.Neuron, NN.LCount+1);
  for i:=0 to NN.LCount do
    read (tf, NN.Neuron[i]);
//Кол-во входов, нейронов, выходов
  readln (tf);
  SetLength (NN.inf, NN.Neuron[0]+NN.Neuron[NN.LCount], 3);
//Информация об обучающей выборке
  for i:=0 to Length(NN.inf)-1 do begin

```

```

    for j:=0 to 2 do
        read (tf, NN.inf[i, j]);
        readln (tf)
    end;
    readln (tf, NN.alpha);
//Альфа
    SetLength (NN.W, NN.LCount);
//Весовые коэффициенты
    For k:=0 to NN.LCount-1 do begin
//№ слоя
        SetLength (NN.W[k], NN.Neuron[k]+1, NN.Neuron[k+1]);
        For i:=0 to NN.Neuron[k+1]-1 do begin
//Кол-во нейронов слева
            For j:=0 to NN.Neuron[k] do
//Кол-во нейронов справа
                read (tf, NN.W[k, j, i]);
//Весовые коэф.
                readln (tf);
            end;
        end;
        SetLength (NN.Xmax, NN.Neuron[0]);
        SetLength (NN.Xmin, NN.Neuron[0]);
        SetLength (NN.Ymax, NN.Neuron[NN.LCount]);
        SetLength (NN.Ymin, NN.Neuron[NN.LCount]);
        For i:=0 to NN.Neuron[0]-1 do
            read (tf, NN.Xmax[i]);
//Xmax
            For i:=0 to NN.Neuron[NN.LCount]-1 do
                read (tf, NN.Ymax[i]);
//Ymax
            readln (tf);
            For i:=0 to NN.Neuron[0]-1 do
                read (tf, NN.Xmin[i]);
//Xmin
            For i:=0 to NN.Neuron[NN.LCount]-1 do
                read (tf, NN.Ymin[i]);
//Ymin
            CloseFile(tf);
        end;

//*****

{<<<РАБОТА С ВЫБОРКАМИ>>>}
//ИЗМЕНЕНИЕ ЦВЕТА ЗАГОЛОВКА
//Универсальная выборка
procedure TForm1.StringGrid9SelectCell(Sender: TObject; ACol,
    ARow: Integer; var CanSelect: Boolean);
begin
    CN1:=ACol;
    StringGrid9.Repaint;
end;

```

```

procedure TForm1.StringGrid9DrawCell(Sender: TObject; ACol, ARow: Integer;
  Rect: TRect; State: TGridDrawState);
begin
  if (ACol=CN1) and (CN1>0) and (ARow=0) then
    StringGrid9.Canvas.Brush.Color:=RGB(160, 255, 128)
  //Цвет выделенной ячейки
  else
    if ARow=0 then
      StringGrid9.Canvas.Brush.Color:=clBtnFace;
      StringGrid9.Canvas.FillRect(Rect);
      StringGrid9.Canvas.TextOut(Rect.Left+2,Rect.Top+2,StringGrid9.Cells[ACol,ARow]);
end;

//Обучающая выборка
procedure TForm1.StringGrid10SelectCell(Sender: TObject; ACol,
  ARow: Integer; var CanSelect: Boolean);
begin
  CN2:=ACol;
  StringGrid10.Repaint;
end;

procedure TForm1.StringGrid10DrawCell(Sender: TObject; ACol, ARow: Integer;
  Rect: TRect; State: TGridDrawState);
begin
  if (ACol=CN2) and (CN2>0) and (ARow=0) then
    StringGrid10.Canvas.Brush.Color:=RGB(160, 255, 128)
  //Цвет выделенной ячейки
  else
    if ARow=0 then
      StringGrid10.Canvas.Brush.Color:=clBtnFace;
      StringGrid10.Canvas.FillRect(Rect);
      StringGrid10.Canvas.TextOut(Rect.Left+2,Rect.Top+2,String-
Grid10.Cells[ACol,ARow]);
end;

//ДОБАВИТЬ В ОБУЧАЮЩУЮ ВЫБОРКУ
procedure TForm1.BitBtn7Click(Sender: TObject);
var i: integer;
begin
  if (CN1=0) or (StringGrid9.Cells[1, 0]='') then begin
    ShowMessage('Выберите необходимые данные из универсальной выборки');
    exit;
  end;
  if StringGrid10.Cells[1, 0]<>' ' then
    StringGrid10.ColCount:=StringGrid10.ColCount+1;
  SetLength (inf, StringGrid10.ColCount-1, 3);
  //Вх/вых, масштабирование, имя переменной
  inf[StringGrid10.ColCount-2, 0]:=RadioGroup1.ItemIndex;
  if RadioGroup1.ItemIndex=0 then
    StringGrid10.Cells[StringGrid10.ColCount-1, 0]:=StringGrid9.Cells[CN1, 0]

```

```

//Входная переменная
    +' (вх, '
else
    StringGrid10.Cells[StringGrid10.ColCount-1, 0]:=StringGrid9.Cells[CN1, 0]
//Выходная переменная
    +' (вых, ';
    inf[StringGrid10.ColCount-2, 1]:=RadioGroup2.ItemIndex;
    Case RadioGroup2.ItemIndex of 0:
//Без масштабирования
    begin
        StringGrid10.Cells[StringGrid10.ColCount-1, 0]:=
            StringGrid10.Cells[StringGrid10.ColCount-1, 0]+'EM)';
        for i:=1 to StringGrid9.RowCount-1 do
            StringGrid10.Cells[StringGrid10.ColCount-1, i]:=StringGrid9.Cells[CN1, i];
        end;

1:
//Десятичный логарифм
    begin
        StringGrid10.Cells[StringGrid10.ColCount-1, 0]:=
            StringGrid10.Cells[StringGrid10.ColCount-1, 0]+'Lg)';
        for i:=1 to StringGrid9.RowCount-1 do
            StringGrid10.Cells[StringGrid10.ColCount-1, i]:=FloatToStrf(Log10
                (StrToFloat(StringGrid9.Cells[CN1, i])), ffgeneral, 5, 2);
        end;

2:
//Натуральный логарифм
    begin
        StringGrid10.Cells[StringGrid10.ColCount-1, 0]:=
            StringGrid10.Cells[StringGrid10.ColCount-1, 0]+'Ln)';
        for i:=1 to StringGrid9.RowCount-1 do
            StringGrid10.Cells[StringGrid10.ColCount-1, i]:=FloatToStrf(Ln
                (StrToFloat(StringGrid9.Cells[CN1, i])), ffgeneral, 5, 2);
        end;

3:
//Синус
    begin
        StringGrid10.Cells[StringGrid10.ColCount-1, 0]:=
            StringGrid10.Cells[StringGrid10.ColCount-1, 0]+'Sin)';
        for i:=1 to StringGrid9.RowCount-1 do
            if (Sin(DegToRad(StrToFloat(StringGrid9.Cells[CN1, i])))<0.0000000001)
                and (Sin(DegToRad(StrToFloat(StringGrid9.Cells[CN1, i])))>-0.0000000001)
            then
                StringGrid10.Cells[StringGrid10.ColCount-1, i]:='0'
            else
                StringGrid10.Cells[StringGrid10.ColCount-1, i]:=FloatToStrf(Sin
                    (DegToRad(StrToFloat(StringGrid9.Cells[CN1, i]))), ffgeneral, 5, 2);
            end;

4:
//Косинус
    begin
        StringGrid10.Cells[StringGrid10.ColCount-1, 0]:=

```

```

StringGrid10.Cells[StringGrid10.ColCount-1, 0]+'Cos)';
for i:=1 to StringGrid9.RowCount-1 do
  if (Cos(DegToRad(StrToFloat(StringGrid9.Cells[CN1, i])))<0.0000000001)
  and (Cos(DegToRad(StrToFloat(StringGrid9.Cells[CN1, i])))>-0.0000000001)
  then
    StringGrid10.Cells[StringGrid10.ColCount-1, i]:='0'
  else
    StringGrid10.Cells[StringGrid10.ColCount-1, i]:=FloatToStrf(Cos
      (DegToRad(StrToFloat(StringGrid9.Cells[CN1, i])), ffgeneral, 5, 2);
  end;
end;
inf[StringGrid10.ColCount-2, 2]:=CN1-1;
//Имя переменной
end;

//УДАЛИТЬ ИЗ ОБУЧАЮЩЕЙ ВЫБОРКИ
procedure TForm1.BitBtn8Click(Sender: TObject);
var i, j: integer;
begin
  if (CN2=0) or (StringGrid10.Cells[1, 0]='') then begin
    ShowMessage('Выберите необходимые данные из обучающей выборки');
    exit;
  end;
  if MessageBox(0, 'Вы уверены?', 'Удалить', mb_iconquestion or mb_YesNo)=IdYes
  then begin
    if (StringGrid10.ColCount=2) and (CN2=1) then begin
      for i:=0 to StringGrid10.RowCount-1 do
        StringGrid10.Cells[1, i]:='';
      for i:=0 to 2 do
        inf[0, i]:=0;
      end
    else begin
      for j:=CN2 to StringGrid10.ColCount-2 do begin
        for i:=0 to StringGrid10.RowCount-1 do
          StringGrid10.Cells[j, i]:=StringGrid10.Cells[j+1, i];
        for i:=0 to 2 do
          inf[j-1, i]:=inf[j, i];
        end;
        StringGrid10.ColCount:=StringGrid10.ColCount-1;
        SetLength (inf, StringGrid10.ColCount-1);
      end;
    end;
  end;
end;

//ЭКСПОРТ
procedure TForm1.BitBtn9Click(Sender: TObject);
var inf1, MINi1: Tarray1b;
    inf2: Tarray2b;
    i, j, n, s: integer;
    MIN, MINi, k: byte;
begin

```

```

if StringGrid10.Cells[1, 0]='' then begin
  ShowMessage('Составьте обучающую выборку');
  exit;
end;
s:=0;
for i:=0 to Length(inf)-1 do
  s:=s+inf[i, 0];
if s=0 then begin
  ShowMessage('Обучающая выборка должна содержать хотя бы одну выходную перемен-
ную');
  exit;
end;
s:=s-Length(inf);
if s=0 then begin
  ShowMessage('Обучающая выборка должна содержать хотя бы одну входную перемен-
ную');
  exit;
end;
SetLength (inf1, Length(inf));
SetLength (MINi1, Length(inf));
SetLength (inf2, Length(inf), Length(inf[0]));
StringGrid1.ColCount:=StringGrid10.ColCount;
StringGrid1.RowCount:=StringGrid10.RowCount;
StringGrid6.ColCount:=StringGrid10.ColCount;
StringGrid4.RowCount:=StringGrid10.RowCount;
StringGrid6.Cells[0, 0]:='MAX';
StringGrid6.Cells[0, 1]:='MIN';
StringGrid7.Cells[0, 0]:='Входы';
StringGrid7.Cells[1, 0]:='Слой 1';
StringGrid7.Cells[2, 0]:='Выходы';
for i:=0 to StringGrid10.RowCount-1 do begin
  StringGrid1.Cells[0, i]:=StringGrid10.Cells[0, i];
  StringGrid4.Cells[0, i]:=StringGrid10.Cells[0, i];
end;
for i:=0 to Length(inf1)-1 do begin
  inf1[i]:=inf[i, 2];
  for j:=0 to 2 do
    inf2[i, j]:=inf[i, j];
end;
for j:=0 to Length(inf1)-1 do begin
  MIN:=inf1[0];
  MINi:=0;
  for i:=1 to Length(inf1)-1 do
    if inf1[i]<MIN then begin
      MIN:=inf1[i];
      MINi:=i;
    end;
  inf1[MINi]:=255;
  for i:=0 to 2 do
    inf[j, i]:=inf2[MINi, i];
  MINi1[j]:=MINi;

```

```

end;
for i:=0 to Length(inf1)-1 do
  for j:=0 to 2 do
    inf2[i, j]:=inf[i, j];
n:=-1;
for i:=0 to Length(inf1)-1 do begin
  if inf2[i, 0]=0 then begin
    n:=n+1;
    for j:=0 to 2 do
      inf[n, j]:=inf2[i, j];
    for j:=0 to StringGrid10.RowCount-1 do
      StringGrid1.Cells[n+1, j]:=StringGrid10.Cells[MINi1[i]+1, j];
    end;
  end;
end;
StringGrid7.Cells[0, 1]:=IntToStr(n+1);
StringGrid7.Cells[2, 1]:=IntToStr(Length(inf)-(n+1));
StringGrid4.ColCount:=Length(inf)-n;
k:=0;
for i:=0 to Length(inf1)-1 do begin
  if inf2[i, 0]=1 then begin
    n:=n+1;
    k:=k+1;
    for j:=0 to 2 do
      inf[n, j]:=inf2[i, j];
    for j:=0 to StringGrid10.RowCount-1 do
      StringGrid1.Cells[n+1, j]:=StringGrid10.Cells[MINi1[i]+1, j];
      StringGrid4.Cells[k, 0]:=StringGrid10.Cells[MINi1[i]+1, 0];
    end;
  end;
end;
PageControl2.ActivePage:=TabSheet3;
SpinEdit2.Enabled:=True;
end;

//*****

{<<<ОБУЧЕНИЕ>>>}
//НАСТРОЙКА КОЛ-ВА СЛОЕВ
procedure TForm1.SpinEdit2Change(Sender: TObject);
var i: byte;
begin
  i:=StrToInt(StringGrid7.Cells[StringGrid7.ColCount-1, 1]);
  StringGrid7.Cells[StringGrid7.ColCount-1, 1]:=i;
  LCount:=SpinEdit2.Value+1;
  StringGrid7.ColCount:=LCount+1;
//Табл. для настройки кол-ва входов и нейронов по слоям
  StringGrid7.Cells[StringGrid7.ColCount-1, 1]:=IntToStr(i);
  for i:=1 to LCount-1 do
    StringGrid7.Cells[i, 0]:='Слой '+IntToStr(i);
    StringGrid7.Cells[LCount, 0]:='Выходы';
  end;
end;

```

```

//ОБУЧЕНИЕ
procedure TForm1.BitBtn15Click(Sender: TObject);
var i, j, k, kp: word;
    Epoch, e: integer;
    n: real;
    a: Tarray1w;
    X, Y: Tarray2r;
    net: Tarray2r;
begin
    if StringGrid1.Cells[1, 0]='' then begin
        ShowMessage('Составьте обучающую выборку');
        exit;
    end;
    LCount:=SpinEdit2.Value+1;
    SetLength(Neuron, LCount+1);
//Вектор кол-ва входов и нейронов НС по слоям
    for i:=0 to LCount do
        try
            Neuron[i]:=StrToInt(StringGrid7.Cells[i, 1]);
//Вектор кол-ва входов и нейронов НС по слоям
            except begin
                ShowMessage('Неверно заданы настройки слоев нейронной сети');
                exit;
            end;
        end;
    try
        alpha:=StrToFloat(Edit2.Text);
//Альфа
        except begin
            ShowMessage('Неверно задан коэффициент альфа');
            exit;
        end;
    end;
    W:=func1(LCount, Neuron);
//Матрица весовых коэф.
    SetLength(X, StringGrid1.RowCount-1, Neuron[0]);
//Массив данных X для обучения
    SetLength(Y, StringGrid1.RowCount-1, Neuron[LCount]);
//Массив данных Y для обучения
    SetLength(Ymax, Neuron[LCount]);
//Массив Ymax значений
    SetLength(Ymin, Neuron[LCount]);
//Массив Ymin значений
    SetLength(Xmax, Neuron[0]);
//Массив Xmax значений
    SetLength(Xmin, Neuron[0]);
//Массив Xmin значений

//Поиск Xmin, Xmax, заполнение массива X
    for j:=0 to Neuron[0]-1 do begin
        Xmax[j]:=StrToFloat(StringGrid1.Cells[j+1, 1]);

```

```

Xmin[j]:=StrToFloat(StringGrid1.Cells[j+1, 1]);
  for i:=0 to StringGrid1.RowCount-2 do begin
    X[i, j]:=StrToFloat(StringGrid1.Cells[j+1, i+1]);
//Данные для обучения в массив
    Xmax[j]:=func2(X[i, j], Xmax[j]);
//Поиск макс. значение
    Xmin[j]:=func3(X[i, j], Xmin[j]);
//Поиск мин. значение
    end;
    StringGrid6.Cells[j+1, 0]:=FloatToStr (Xmax[j]);
    StringGrid6.Cells[j+1, 1]:=FloatToStr (Xmin[j]);
  end;

//Поиск Ymin, Ymax, заполнение массива Y
  for j:=0 to Neuron[LCount]-1 do begin
    Ymax[j]:=StrToFloat(StringGrid1.Cells[Neuron[0]+j+1, 1]);
    Ymin[j]:=StrToFloat(StringGrid1.Cells[Neuron[0]+j+1, 1]);
    for i:=0 to StringGrid1.RowCount-2 do begin
      Y[i, j]:=StrToFloat(StringGrid1.Cells[Neuron[0]+j+1, i+1]);
//Данные для обучения в массив
      Ymax[j]:=func2(Y[i, j], Ymax[j]);
//Поиск макс. значение
      Ymin[j]:=func3(Y[i, j], Ymin[j]);
//Поиск мин. значение
      end;
      StringGrid6.Cells[Neuron[0]+j+1, 0]:=FloatToStr (Ymax[j]);
      StringGrid6.Cells[Neuron[0]+j+1, 1]:=FloatToStr (Ymin[j]);
    end;

//Нормирование данных для обучения
  for i:=0 to StringGrid1.RowCount-2 do begin
    for j:=0 to Neuron[0]-1 do
      X[i, j]:=func4(X[i, j], Xmax[j], Xmin[j]);
    for j:=0 to Neuron[LCount]-1 do
      Y[i, j]:=func4(Y[i, j], Ymax[j], Ymin[j]);
    end;

  try
    n:=StrToFloat(Edit1.Text);
//Норма (скорость) обучения
    except begin
      ShowMessage('Неверно задана норма обучения');
      exit;
    end;
  end;
  SetLength(a, StringGrid1.RowCount-1);
//Массив индексов
  try
    Epoch:=StrToInt(Edit3.Text);
//Кол-во эпох обучения
    except begin

```

```

    ShowMessage('Неверно задано количество эпох обучения');
    exit;
end;
end;
SetLength(net, LCount+1);
for i:=0 to LCount do
    SetLength(net[i], Neuron[i]);

//Обучение
for e:=0 to Epoch do begin
    a:=func5 (StringGrid1.RowCount);
//Заполняем массив индексов рандомом
    for kp:=0 to StringGrid1.RowCount-2 do begin
//Кол-во примеров в обучающей выборке
        for i:=0 to Neuron[0]-1 do
            net[0, i]:=X[a[kp], i];
            net:=func6(Neuron, LCount, W, alpha, net);
//Прямой проход
            W:=func7(Neuron, LCount, Y, net, a, kp, W, n);
//Новые весовые коэф.
            end;
            ProgressBar1.Position:=Round(100*e/Epoch);
            Application.ProcessMessages;
        end;

//Расчет Y для обучающей выборки
        for kp:=0 to StringGrid1.RowCount-2 do begin
//Кол-во примеров в обучающей выборке
            for i:=0 to Neuron[0]-1 do
                net[0, i]:=X[kp, i];
                net:=func6(Neuron, LCount, W, alpha, net);
//Прямой проход
                for i:=0 to Neuron[LCount]-1 do begin
//Кол-во нейронов вых. слоя
                    Y:=func8(kp, i, net, LCount, Ymax, Ymin);
                    StringGrid4.Cells [i+1, kp+1]:=FloatToStrf(Y[kp, i], ffgeneral, 5, 2);
                end;
            end;
        end;
end;

//Перемещение MAX/MIN с основной таблицей
procedure TForm1.StringGrid1DrawCell(Sender: TObject; ACol, ARow: Integer;
    Rect: TRect; State: TGridDrawState);
begin
    StringGrid6.LeftCol:=StringGrid1.LeftCol;
end;
procedure TForm1.StringGrid6DrawCell(Sender: TObject; ACol, ARow: Integer;
    Rect: TRect; State: TGridDrawState);
begin
    StringGrid1.LeftCol:=StringGrid6.LeftCol;
end;

```