Все наше знание
только вероятно.
Рейхенбах

А.В. Звягинцева ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МЕТОДЫ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ

А.В. Звягинцева

ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МЕТОДЫ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ

ПРИРОДНО-АНТРОПОГЕННЫХ СИСТЕМ

А.В. Звягинцева

ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МЕТОДЫ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ПРИРОДНО-АНТРОПОГЕННЫХ СИСТЕМ

Спектр
Издательский дом
Москва, 2016

УДК 303.732.4:001.5:504
ББК 20.1в67в631
З-45

Рекомендовано к печати Ученым советом Донецкого национального технического университета (протокол № 5 от 24.06.2016)

Утверждено на заседании редакционно-издательского совета Белгородского национального исследовательского университета (протокол № 5 от 01.06.2016)

Рецензенты:
И.С. Константинов – проректор по научной и инновационной деятельности Белгородского государственного национального исследовательского университета, докт. техн. наук, проф.;
В.И. Халимон – зав. кафедрой системного анализа Санкт-Петербургского государственного технологического института (технический университет), докт. техн. наук, проф;
Ф.В. Недопекин – профессор кафедры физики неравновесных процессов, метрологии и экологии Донецкого национального университета, докт. техн. наук, проф.

Звягинцева А.В.
З-45 Вероятностные методы комплексной оценки природно-антропогенных систем / Под науч. ред. д.т.н., проф. Г.В. Аверина. – М.: Издательский дом «Спектр», 2016. – 257 с.
ISBN 978-5-4442-0120-6

В монографии изучены проблемы комплексной оценки природно-антропогенных систем, изложены основные гипотезы и методы исследований в данной области. Разработаны вероятностные методы комплексной оценки систем, предложены методики определения различных индексов и рейтингов, а также методы оценки рисков неблагоприятных и опасных событий при изучении природно-антропогенных процессов. Приведены примеры решения прикладных задач применительно к оценке состояния и развития стран, регионов, городов и природно-промышленных комплексов.

Книга предназначена для широкого круга специалистов, занимающихся проблемами комплексной оценки и системного анализа, стратегического прогнозирования и планирования – экспертов, аналитиков, специалистов в области безопасности систем, научных работников и преподавателей, а также всех тех, кого интересуют вопросы применения вероятностных и естественнонаучных методов исследований при изучении социальных, экономических, экологических и биологических систем.

Zviagintseva A.V.
Z96 Probabilistic methods of a complex assessment of natural and anthropogenic systems / Scientifically edited by Dr.-Ing., prof. G.V. Averin. – Moscow: Izdatelskiy dom “Cpektr”, 2016. – 257 p.

In the monograph problems of a complex assessment of natural and anthropogenic systems are studied, the main hypotheses and methods of researches in this field are stated. Probabilistic methods of a complex assessment of systems are developed, techniques of definition of various indexes and ratings, and also methods of an assessment of risks of adverse and dangerous events in studying natural and anthropogenic processes are proposed. Examples of the solution of applied problems in relation to an assessment of a state and development of the countries, regions, cities and natural and industrial complexes are given.

The book is intended for a wide range of the experts dealing with problems of a complex assessment and the system analysis, strategic forecasting and planning.

ISBN 978-5-4442-0120-6 © Звягинцева А.В., 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие научного редактора.....……... 7

ВВЕДЕНИЕ..…….. 8

ГЛАВА 1. ПРОБЛЕМЫ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ПРИРОДНО-АНТРОПОГЕННЫХ СИСТЕМ.…….. 12

1.1 Природно-антропогенные системы и их характеристика.……. 12

1.2 Существующая методология комплексной оценки.……... 18

1.3 Оценка рисков и системные модели в комплексной оценке…. 31

1.4 Выводы и некоторые актуальные задачи комплексной оценки 37

ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ, ГИПОТЕЗЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ... 44

2.1 Принципы, гипотезы и методы построения теории комплексной оценки на основе феноменологического анализа данных……. 44

2.2 Объекты комплексной оценки и данные……. 57

ГЛАВА 3. ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МЕТОДЫ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ПРИРОДНО-АНТРОПОГЕННЫХ СИСТЕМ...….…….. 67

3.1 Некоторые используемые понятия и определения …… 67

3.2 Дифференциальные уравнения для вероятностного описания состояний природно-антропогенных систем.……. 77

3.3 Формулировка основных зависимостей для комплексной оценки…….… 85

3.4 Определение вероятности событий при наблюдении показателей природно-антропогенных систем……... 88

3.5 Вероятностные закономерности формирования природно-антропогенных процессов…….…… 98

ГЛАВА 4. КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА В ГОРОДАХ И НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТАХ……. 105

4.1 Существующие подходы к оценке опасности загрязнения атмосферного воздуха……..... 105

4.2 Оценка опасности загрязнения атмосферного воздуха по данным экологического мониторинга……..……..…… 108
4.3 Оценка опасности загрязнения атмосферного воздуха по данным проявления токсических процессов у биологических объектов……..... 118
4.4 Опасные события и их риски при загрязнении атмосферного воздуха…… 124
4.5 Метод комплексной оценки загрязнения атмосферного воздуха на основе определения вероятности неблагоприятных событий……... 131
4.6 Метод оценки рисков негативных воздействий на биологические объекты при загрязнении атмосферного воздуха……..…….. 141

ГЛАВА 5. ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ПРИРОДНО-АНТРОПОГЕННЫХ СИСТЕМ..... 158
5.1 Общая методика комплексной оценки и многопараметрического ранжирования систем……... 158
5.2 Комплексная оценка состояния и развития городов Европы и мира..... 162
5.3 Комплексная оценка экологического состояния стран Европы……. 169
5.4 Стратегическое прогнозирование состояния и развития стран и их регионов по показателям человеческого развития…….. 174
5.5 Вероятностные модели биоразнообразия и комплексная оценка видов……..... 197
5.6 Комплексная оценка состояния социальных групп…… 220

ЛИТЕРАТУРА……... 231

Приложение А. Некоторые показатели и индикаторы для комплексной оценки природно-антропогенных и урбанизированных систем…….. 245

Приложение Б. Краткое описание алгоритмов определения статистической вероятности событий…… 252

CONTENTS

Foreword of the scientific editor…….. 7

INTRODUCTION …… 8

CHAPTER 1. PROBLEM OF A COMPLEX ASSESSMENT OF NATURAL AND ANTHROPOGENIC SYSTEMS ……... 12

1.1 Natural and anthropogenic systems and their characteristics …... 12
1.2 The existing methodology of a complex assessment …… 18
1.3 Assessment of risks and system models in a complex assessment 31
1.4 Conclusions and some actual problems of a complex assessment 37

CHAPTER 2. OBJECTS, HYPOTHESES AND METHODS OF RESEARCH……..…… 44

2.1 The principles, hypotheses and methods of construction of the theory of complex evaluation on the basis of phenomenological analysis of data……. 44
2.2 Objects of a complex assessment and data...…… 57

CHAPTER 3. PROBABILISTIC METHODS OF A COMPLEX ASSESSMENT OF NATURAL AND ANTHROPOGENIC SYSTEMS... 67

3.1 Some used terms and definitions……..... 67
3.2 The differential equations for the probabilistic description of states of natural and anthropogenic systems ……. 77
3.3 The formulation of the main dependences for a complex assessment……. 85
3.4 Definition of probability of events at observation of indicators of natural and anthropogenic systems……... 88
3.5 Probabilistic regularities of formation of natural and anthropogenic processes…… 98

CHAPTER 4. COMPLEX ASSESSMENT OF POLLUTION OF ATMOSPHERIC AIR IN THE CITIES AND SETTLEMENTS …… 105

4.1 The existing approaches to an assessment of danger of pollution of atmospheric air……..... 105

4.2 Assessment of danger of pollution of atmospheric air according to environmental monitoring.……..……..……..... 108
4.3 Assessment of danger of pollution of atmospheric air according to demonstration of toxic processes in biological objects…..... 118
4.4 Dangerous events and their risks at pollution of atmospheric air.. 124
4.5 Method of a complex assessment of pollution of atmospheric air on the basis of definition of probability of adverse events.……... 131
4.6 Method of an assessment of risks of negative actions on biological objects at pollution of atmospheric air.…… 141

CHAPTER 5. APPLIED PROBLEMS OF A COMPLEX ASSESSMENT OF NATURAL AND ANTHROPOGENIC SYSTEMS..... 158

5.1 General technique of a complex assessment and multiple parameter ranging of systems.…….. 158
5.2 Complex assessment of a state and development of the cities of Europe and world..... 162
5.3 Complex assessment of an ecological state of the countries of Europe.…….. 169
5.4 Strategic forecasting of a state and development of the countries and their regions on indicators of human development.……... 174
5.5 Probabilistic models of a biodiversity and complex assessment of species……..……..……..... 197
5.6 Complex assessment of a state of social groups……..…… 220

REFERENCES…….. 231

Appendix A. Some indexes and indicators for a complex assessment of the natural and anthropogenic and urbanized systems…….. 245

Appendix B. Brief description of algorithms of definition of statistical probability of events…….. 252

Предисловие научного редактора

Комплексная оценка природно-антропогенных и социально-экономических систем относится к области современной науки, которая интенсивно развивается как междисциплинарное направление. Известно, что на стыке различных областей знаний почва для прогрессивных идей всегда плодотворна. Данное направление обладает также всеми чертами зарождающейся новой науки – собственной развивающейся методологией, громадным фактографическим материалом данных наблюдений применительно к системам различной природы, множеством практических задач, требующих решения.

Теоретическое значение данной работы заключается в поиске решения фундаментальной проблемы науки, связанной с использованием в исследованиях экологических, природно-антропогенных и социально-экономических процессов и явлений естественнонаучных методов, и развитии методологии комплексной оценки природно-антропогенных и урбанизированных систем и объектов. Оригинальность научных результатов связана с идеей представления статистических наблюдений в виде многомерной выборки данных опыта из непрерывной гипотетической среды, характеризующей состояния объектов по множеству показателей. Это дает возможность использовать математический аппарат, который применяется сегодня в естественных науках.

Настоящая книга написана молодым докторантом и посвящена теории и приложениям вероятностных методов комплексной оценки систем, исходя из анализа сложных событий, которые характеризуют состояние и развитие этих систем. Данный подход является новым и может заинтересовать многих специалистов, деятельность которых связана с решением задач в сфере урбанистики, регионалистики, глобалистики, охраны окружающей среды, национальной и экологической безопасности, а также с различными системными и прогнозными исследованиями. Хочется надеяться, что данная монография будет с интересом принята широким кругом специалистов, занимающихся проблемами системного анализа, комплексной оценки систем и стратегического прогнозирования.

Аверин Г.В., д.т.н., проф.

Наука начинается тогда, когда
человек подходит к явлениям
природы с числом и мерою

В.И. Вернадский

ВВЕДЕНИЕ

Проблема комплексной оценки различных природно-антропогенных систем, а также анализа риска опасных природных и антропогенных процессов является одной из фундаментальных проблем современной науки. Сегодня это направление исследований в своей базовой методологии опирается преимущественно на экспертные методы, которые повсеместно используются в научных и практических целях. Любые экспертные оценки по своей природе являются субъективными, их достоверность зависит от опыта эксперта и его аналитических возможностей при оценке развития ситуаций.

Существует и другой путь решения данной проблемы, который отличается междисциплинарным характером научных исследований и связан с использованием при изучении природных, экологических, антропогенных и техногенных процессов естественнонаучных методов. Моделирование таких процессов может основываться на вероятностных подходах анализа и описания количественных данных, полученных в процессе наблюдений или опыта. Данное научное направление в науке имеет большое значение, так как позволяет предложить объективные теоретические методы исследования многомерных природно-антропогенных систем. Создание новых методов комплексной оценки, а также методик объективного ранжирования объектов по комплексу показателей может способствовать решению проблемы разработки достоверных прогнозов на среднесрочную и долгосрочную перспективу во многих областях знаний.

Разработка вероятностных методов комплексной оценки и анализа рисков требует привлечения аппарата математического моделирования, средств описания статистических данных и информационных методов анализа разноплановой информации. Основная трудность состоит в том,

что теоретические методы в данных областях науки проработаны весьма слабо. Теоретические и экспериментальные исследования в данном направлении проводились Дж. Форрестером, Д.Х. Медоузом, П. Анохиным, Р. Уиттекером, А.А. Акаевым, М.З. Згуровским, В.Д. Могилевским, К. Боулдингом, В.И. Кузнецовым, Е.А. Яйли, Ю. Израэлем, В. Маршалом, С.Л. Авалиани, А.Б. Качинским, А.В. Киселевым и многими другими авторами.

Однако, несмотря на множество исследований в данной области, существенного прогресса в решении проблемы пока не наблюдается. Основная причина этого лежит в отсутствии концептуальных представлений и общей теории оценки состояний природно-антропогенных систем и процессов их развития.

Из всего многообразия нерешенных проблем автором были выбраны те из них, которые направлены на развитие методологии моделирования природно-антропогенных систем, охватывающей разные классы объектов, которая позволила бы исследователю создавать вероятностные модели изучаемых систем и процессов на основе данных наблюдений. Это связано с тем, что сегодня в повестке дня остро стоит вопрос создания новой методологии прикладного моделирования природно-антропогенных систем, которая позволяла бы использовать общую логическую схему анализа данных и построения моделей по отношению к различным природным, антропогенным и экологическим процессам. Вероятностные модели отличаются высоким уровнем формализации и универсальностью представления, они могут быть ориентированы на описание самых различных массивов количественной информации, где присутствуют данные экологического, социального и экономического характера. Также событийные модели позволяют проводить системный анализ как количественных, так и качественных данных.

Преимущество данной книги состоит в том, что предложенные методы позволяют построить вероятностные модели описания данных, характеризующих результаты опыта или наблюдений для самых различных систем. Основное требование к данным – это возможность их представления в виде трехмерных массивов «объекты-показатели-время». Для подавляющего большинства социально-экономических,

экологических, биологических и технологических систем информация об их состоянии и развитии может быть представлена в подобном виде (страны мира, города, природно-антропогенные системы, биологические виды, техногенные объекты, группы людей и т.д.).

Так как в основе предлагаемого метода лежит вероятностная оценка сложных совместных событий, то при комплексном анализе возможно одновременное изучение самых различных показателей систем, качественно отличающихся между собой.

Важной особенностью монографии является значительное количество практических примеров по комплексной оценке стран мира, городов, биологических объектов, что указывает на широкие возможности применения вероятностных методов в прикладных областях.

Первая глава книги посвящена изучению проблем комплексной оценки природно-антропогенных систем. Вторая и третьи главы связаны с изучением объектов и формулировкой гипотез и методов исследования, а также формулировкой теоретических основ комплексной оценки природно-антропогенных систем.

Последующие главы книги связаны с прикладными приложениями вероятностных методов комплексной оценки. В частности, на основе существующих опытных данных выполнена оценка рисков загрязнения атмосферного воздуха в городах и населенных пунктах по различным опасным событиям. Проведена комплексная оценка состояния и развития городов Европы и мира. Показано, как вероятностные методы могут быть использованы при стратегической оценке стран и регионов по показателям человеческого развития. В данных главах предложены альтернативные методики расчета индекса человеческого развития, международного индекса счастья, индекса развития городов, комплексного индекса загрязнения атмосферного воздуха, ранжирования стран по экологическим показателям и т.д. Такие методики могут использоваться независимыми экспертами в своей работе при определении индексов и оценки рейтингов различных природно-антропогенных систем.

Отдельный раздел книги посвящен проблемам биологического разнообразия, вероятностным методам комплексной оценки в этой области и изучению эволюционного развития биологических систем.

Благодарности. При написании рукописи использованы результаты научных исследований, выполненные автором в Донецком национальном техническом университете и в Белгородском национальном исследовательском университете.

Я выражаю искреннюю благодарность всем тем, чья помощь и поддержка способствовала подготовке и изданию данной монографии.

В первую очередь, слова глубокой благодарности и признательности адресую своему Учителю и научному редактору монографии профессору Г.В. Аверину, высказавшему идею создания книги и оказавшему неоценимую помощь в формировании актуальных направлений исследований.

Отдельные слова благодарности выражаю рецензентам – профессорам И.С. Константинову, В.И. Халимон и Ф.В. Недопекину, взявшим на себя нелегкий труд по рецензированию рукописи монографии. Их ценные советы, критические замечания и конструктивные предложения способствовали улучшению содержания и стиля монографии, а обсуждения и дискуссии с проф. И.С. Константиновым позволили также глубже вникнуть в проблему комплексной оценки сложных систем как междисциплинарного направления науки.

Я высказываю свою признательность сотрудникам кафедр компьютерного моделирования и дизайна Донецкого национального технического университета, общей математики Белгородского национального исследовательского университета, а также физики неравновесных процессов, метрологии и экологии Донецкого национального университета. С рядом преподавателей этих кафедр меня связывает научно-педагогическая деятельность, длительные творческие контакты и совместные публикации.

Я благодарна канд. физ.-мат. наук, доценту М.В. Шевцовой (НИУ «БелГУ»), старшему преподавателю А.С. Хоруженко, магистранту В. Бойко (ДонНТУ), оказавшим разностороннюю помощь при написании и подготовке монографии, а также приношу благодарность сотрудникам издательства, участвовавшим в подготовке книги. Специальная благодарность семье за поддержку и понимание на всех этапах работы.

Все замечания и отзывы о книге будут приняты с признательностью, просьба присылать их по электронной почте на адрес: anna_zv@ukr.net.

А. Звягинцева,

Донецк – Белгород, 14.05.2016 г.

Глава первая

ПРОБЛЕМЫ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ПРИРОДНО-АНТРОПОГЕННЫХ СИСТЕМ

1.1. Природно-антропогенные системы и их характеристика

В экологической безопасности чаще всего, говоря о состоянии природно-антропогенных и урбанизированных систем, подразумевают загрязнение природных сред, наблюдаемый уровень антропогенного воздействия на природу и человека, а также антропогенные характеристики и видовое биоразнообразие, свойственное таким системам. Различные виды природно-антропогенных систем обычно включают в себя множество однотипных объектов, которые можно считать объектами одного класса.

Например, в урбанистике основными объектами природно-антропогенных систем выступают промышленно-городские агломерации, города и населенные пункты, в глобалистике – страны мира, в регионалистике в качестве объектов рассматривают области, штаты и другие административные единицы различных стран или крупные регионы континентов, в экологических исследованиях объектами изучения выступают однотипные экосистемы, природно-промышленные комплексы, природные зоны и территории, при изучении биоразнообразия – виды, входящие в определенные группы животных или растений и проживающие на изучаемой территории, и т.д.

Обычно под природно-антропогенной системой в экологических исследованиях понимают функционирующую как единое целое совокупность природных и искусственных объектов, формирующихся в естественной среде в результате строительства и эксплуатации различных сооружений и технических средств, и взаимодействующих с природными объектами. В таких системах большую роль играют не только естественные природные процессы, но и искусственные антропогенные и техногенные процессы.

В соответствии с законодательством под природно-антропогенным объектом понимают природный объект, преобразованный в процессе

хозяйственной и иной деятельности, или объект, обладающий свойствами природных объектов, созданный человеком и имеющий рекреационное и защитное значение.

Природно-антропогенная система непременно возникает как сложное геообразование в любом регионе в связи с происходящей в нем хозяйственной деятельностью человека и приходит на смену природным геосистемам, существовавшим там до появления в природной среде людей, инженерных сооружений и техники.

Анализ работ многих авторов указывает на то, что природно-антропогенные системы можно рассматривать как системный набор абиотических и биотических компонентов, взаимосвязанных между собой потоками вещества и энергии в процессе функционирования. Такими компонентами являются: геологическая и ландшафтная среды; воздушная, водная и почвенная среды; биологические организмы, антропогенные и техногенные объекты (здания, установки, сооружения, транспорт, технические комплексы и т.д.).

К природно-антропогенным и урбанизированным системам относятся страны, промышленно-городские агломерации, города и населенные пункты, сельскохозяйственные территории с разнообразными сельскими поселениями, отдельные крупные промышленные предприятия и индустриальные зоны, транспортные коммуникации с зонами их размещения, энергетические природно-технические комплексы, горнорудные предприятия вместе с зонами их влияния, гидротехнические сооружения с водными объектами, рекреационные системы с антропогенными объектами и др.

Данные системы отличаются дуализмом. С одной стороны, первоначальные природные особенности таких систем в значительной степени изменены и состояния систем определяются антропогенной нагрузкой, действующей на них. С другой стороны, основные особенности их функционирования во многом зависят от природных условий, в которых эти системы находятся. Компоненты ландшафта, геологическое строение, климат, водные объекты, лесные массивы или зеленые зоны могут быть изменены, однако сохраняют свои основные особенности в пределах природно-антропогенных систем. Таким образом, природно-

антропогенная среда таких систем состоит из частично измененных человеческой деятельностью природных систем, которые развиваются под постоянным воздействием человека.

Среди природно-антропогенных систем в отдельный класс выделяют урбанизированные системы, т.к. в них природные процессы и окружающая среда наиболее изменены. Реймес среди природно-антропогенных систем особо выделял урбоэкосистемы – «неустойчивые природно-антропогенные системы, состоящие из архитектурно-строительных объектов и резко нарушенных естественных экосистем». Часто под урбанизированной системой понимают экологическую систему, образованную человеческим поселением с соответствующей инфраструктурой. Среда обитания таких систем преобразована или искусственно создана человеком [119].

При комплексной оценке природно-антропогенных и урбанизированных территорий и объектов изучению подлежит ряд составляющих различного уровня иерархии, а именно:

- страны, регионы, промышленно-городские агломерации;
- города и населенные пункты;
- горнорудные и нефтедобывающие комплексы с территориями их размещения (шахты, карьеры, рудники, нефте- и газодобывающие производства и т.д.);
- промышленные и сельскохозяйственные предприятия с зонами их влияния (металлургические, нефтехимические машиностроительные предприятия, взрыво-пожароопасные и химически опасные объекты, сельскохозяйственные и животноводческие комплексы, предприятия пищевой и перерабатывающей отраслей и т.д.);
- транспортные системы (автомобильные и железные дороги, транспортная инфраструктура, морские и речные порты, аэропорты, линии электропередач, газо- и нефтепроводы и т.д.);
- объекты городской застройки (здания, складские, коммерческие и жилые территории, объекты муниципальной собственности и т.д.);
- места складирования отходов (отвалы, терриконы, отстойники, шламонакопители, полигоны твердо-бытовых отходов).

При комплексной оценке природных объектов изучению подлежат:

- леса, лесопокрытые территории и зеленые зоны (леса, урочища, лесозащитные полосы, зеленые насаждения городов, парки и т.д.);
- водные объекты (реки, водохранилища, озера, ставки, пруды и т.д.);
- земли сельскохозяйственного назначения;
- рекреационные территории, природно-заповедные зоны;
- растительный и животный мир изучаемой территории (виды растений и животных).

Классификация природно-антропогенных систем дана в таблице 1.1.

В любой момент времени природно-антропогенная система находится в определенном состоянии. Под состоянием системы можно понимать совокупность ее показателей, характеризующих структуру и процессы функционирования систем в определенный момент времени. Каждый объект в природном, биологическом, антропогенном и техногенном отношении может характеризоваться множеством показателей, свойственным только данному виду природно-антропогенных систем. Для характеристики самых разных аспектов систем в мировой практике разработаны комплексы показателей и индикаторов, которые приняты к использованию научным сообществом [17, 58, 75, 99, 126 – 133, 138, 147]. Некоторые основные компоненты развития природно-антропогенных систем, анализируемые при комплексной оценке, приведены в таблице 1.2, более подробно некоторые показатели приведены в Приложении А.

Выбор индикаторов и показателей для комплексной оценки природно-антропогенных систем (стран, промышленно-городских агломераций, городов, территорий и т.д.) основывается на сборе статистических данных. Перечни индикаторов приводятся в специальной литературе [17, 47, 58, 99, 116, 127, 138]. Данные показатели носят общий характер и собираются на основе официальной статистической информации, а также данных различных субъектов социально-экономического, гигиенического и экологического мониторинга.

Таблица 1.1. – Классификация природно-антропогенных и урбанизированных систем

Природно-антропогенные системы	Занимаемые территории и пространства
Страны, крупные регионы, административные единицы государств	Природно-антропогенные и природные территории стран, штатов, областей, регионов, земель, округов и т.д.
Промышленно-городские агломерации	Природно-промышленные территории нескольких близлежащих городов, населенных пунктов и крупных промышленных предприятий
Города и населенные пункты	Территории городов, городских советов, урбанизированных районов, селитебные[1], коммерческо-деловые и промышленно-складские зоны городской застройки, земли объектов обслуживания (школы, больницы, культурные заведения) и т.д.
Сельскохозяйственные земли с сельскими поселениями	Природно-антропогенные и природные территории сельскохозяйственных районов и лесопокрытых пространств
Природно-промышленные и природно-технические объекты	Территории крупных предприятий и техногенных объектов с зонами их влияния: шахты, карьеры, рудники, гидротехнические сооружения с водными пространствами, энергетические природно-технические комплексы, металлургические и химические предприятия, транспортные системы и объекты, места складирования отходов, объекты жилищно-коммунального хозяйства и системы распределения электроэнергии, тепла и газа и т.д.
Природно-антропогенные объекты	Территории природных комплексов, рекреационных объектов, ландшафтно-рекреационные, заповедные и охраняемые зоны

[1] Селитебная территория предназначена для размещения жилищного фонда, общественных зданий и сооружений, отдельных коммунальных и промышленных объектов, не требующих устройства санитарно-защитных зон; устройства путей внутри городского сообщения, улиц, площадей, парков, садов, бульваров и других мест общего пользования (СП 42.13330.2011 "СНиП 2.07.01-89).

Таблица 1.2. – Компоненты развития природно-антропогенных систем

Группы показателей для комплексной оценки	Основное количество показателей для оценки
Социально-экономическая сфера	15 – 20
Инфраструктура и техногенная деятельность	10 – 15
Здравоохранение и здоровье населения	8 – 15
Образование	10 – 15
Жилищно-коммунальное хозяйство	10 – 15
Производство и потребление	6 – 10
Промышленность и энергетика	15 – 20
Транспорт	5 – 8
Сельское хозяйство	10 – 15
Безопасность граждан	5 – 10
Качество атмосферного воздуха	15 – 20
Водопользование и качество вод	10 – 15
Природа и биоразнообразие	15 – 20
Изменения климата	4 – 6

Основные показатели для комплексной оценки по компонентам развития природно-антропогенных систем приведены в источниках [8, 9, 16, 19, 23, 37 –42, 59, 61, 68, 75, 76, 119, 129, 130]. Кроме того, в России показатели для комплексной оценки определены следующими документами [27, 78, 93, 94] и т.д.

Кроме перечисленных в Приложении А показателей по каждому из компонентов природно-антропогенной среды можно использовать дополнительные индикаторы, которые рекомендуются различными источниками (нормативно-методической документацией, имеющимися нормативами и нормами, проектной документацией и т.д.).

Естественно, что выбор показателей и индикаторов для комплексной оценки может быть значительно расширен, однако для практического применения количество индикаторов часто ограничивают числом не более 8 – 10 показателей по каждому компоненту развития природно-антропогенных систем и урбанизированных территорий.

В настоящее время имеется множество работ, направленных на стандартизацию параметров и индикаторов для комплексной оценки состояния и развития природно-антропогенных систем [8, 9, 17, 18, 37 – 42, 58, 99, 116, 138]. Существуют индикаторы для оценки загрязнения природных сред [8, 9, 47, 51, 53, 59, 94], анализа развития городов [131, 147] и стран мира [38 – 42, 47], оценки биоразнообразия и качества экологических систем [37, 84, 85, 92, 96, 113, 115, 135] и состояния технологических и техногенных систем [21, 103]. Достаточно полный обзор научных и научно-методических исследований в области характеристики и оценки развития городов, регионов и стран мира выполнен в Докладах Программы развития ООН и Всемирного банка [38 – 42], а также трудах аналитических организаций: Brookings Institution, Economic Policy Institute, Forrester Research, Gallup, GlobeScan, Institute for Economics and Peace, New Economic Foundation, The Chicago Council on Global Affairs, The Heritage Foundation, The Legatum Institute и др.

1.2. Существующая методология комплексной оценки

Комплексная оценка состояния природно-антропогенных систем обычно представляет собой очень трудоемкую процедуру из-за наличия большого количества показателей, отражающих самые разные аспекты развития систем и требующих анализа [7]. В таких исследованиях обычно применяются три подхода. Первый подход связан с разработкой обширных докладов о состоянии и предполагаемом развитии систем [30, 37 – 42, 47, 61]. Второй подход, с целью упрощения процедуры анализа, основывается на индикаторном методе, когда для оценки состояния и развития систем вводятся в рассмотрение самые различные индексы, которые интегрируют различные показатели [38 – 42, 59, 75, 83, 84, 93, 115, 131, 147]. Третье теоретическое направление комплексной оценки тесно увязано с системным анализом проблем развития, методологией оценки рисков [62, 70, 72, 77, 87, 93, 102, 103, 108, 136, 140, 144, 145, 148 – 150] и теорией системной динамики [7, 15, 22, 110, 112].

Основные направления и тенденции исследований в области комплексной оценки связаны с совершенствованием средств аналитического и экспертного анализа различных систем, накоплением и созданием все более обширных баз данных показателей состояния, изменения и развития природно-антропогенных систем, применением новых методов визуализации и обработки данных, использованием статистических методов анализа данных, созданием информационно-аналитических систем хранения, представления и обработки данных, разработкой научно-обоснованных методов комплексной оценки, теории оценки рисков и методов системной динамики.

В имеющейся литературе широко представлены доклады аналитиков и экспертов о состоянии и тенденциях развития различных природно-антропогенных систем [37 – 42, 47, 97, 98, 127]. Анализ проводится преимущественно для стран, регионов, городов, отдельных территорий и однотипных объектов.

Как отмечается в работе [7], применение комплексной оценки позволяет существенно расширить пространство для выводов экспертов, однако этот путь часто приводит к обширным докладам по изучаемой проблеме. В таких докладах разделы, посвященные оценке существующего состояния, по объему всегда существенно превышают разделы с практическими результатами, которые несут прогностические выводы. Оценка состояния объекта всегда является первым этапом любого исследования. В докладах по комплексной оценке обычно дается информация о социально-экономическом развитии объектов исследования, загрязнении природных сред, формируется ретроспективный анализ, дается оценка состояния и прогноз развития объектов, изменения состояния окружающей среды и ресурсов, разрабатываются мероприятия и предложения в области исследуемой проблемы и т.д. Создание различных докладов является распространенной инициативой многих аналитических организаций, фондов, международных программ, институтов и университетов.

Комплексная оценка природно-антропогенных систем проводится также на основе самых разных индексов, которые различаются как способами их определения, так и методологическими принципами их

построения. Существуют сотни достаточно известных индексов и мер в области социально-экономического развития стран и регионов, в области охраны окружающей среды, экологии и биоразнообразия. Гипотезы, которые положены в основу моделей, обычно носят частный и субъективный характер и не могут служить основой для надежных количественных методов оценки хотя бы потому, что биологические, экологические и социальные системы нельзя оценивать по одному, хотя и комплексному показателю. Для построения количественных моделей необходима разработка шкал измерения показателей состояния систем, которые бы не являлись в своей основе субъективными. Пока в биологии, экологии и общественных дисциплинах подобных систем количественной оценки не существует. В экологических и социальных науках, которые изучают состояния природно-антропогенных систем, формулировка объективных законов связана со значительными трудностями, так как методология комплексной оценки в своей основе направлена на качественное описание процессов и недостаточно ориентирована на поиск и установление количественных закономерностей в массивах статистической информации.

В практической деятельности для оценки природно-антропогенных систем используются различные индексы, например: человеческого развития, глобальной конкурентоспособности, экономической свободы, экологической эффективности, качества и безопасности жизни, общества, основанного на знаниях, нестабильности стран, восприятия коррупции, демократии, свободы прессы, глобализации, экологического следа, счастья, экологических достижений и т.д. В экологической и промышленной безопасности применяют индекс загрязнения атмосферы, индекс пороговой массы опасных веществ для объектов повышенной опасности, суммарный индекс опасности отдельных компонентов, загрязняющих ту или иную биогеохимическую среду (водную, воздушную среды и грунты) и т.д. Индексы количественно свертывают информацию, которая может помочь обнаружить сложные явления или дать однозначные оценки.

Известно, что индекс – это мера отклонения системы по комплексу свойств от уровня, принятого за базовый [119]. Сегодня научные работы в

данном направлении ведутся в области исследования индикаторов и индексов в рамках общей теории систем Берталанфи [17 – 19, 58, 116, 138]. В результате совместных усилий ученых многих стран мира при активном участии 58-го комитета СКОПЕ (ISEM, г. Найроби, Кения) при UNEP и Комиссии по устойчивому развитию (CSD) научной общественности удалось достичь согласия относительно общих базовых свойств, которыми должны обладать индикаторы и индексы. Таковыми приняты чувствительность, способность к агрегированию, простота интерпретации и научная обоснованность [119].

Обычно методики расчета интегральных индексов основываются исключительно на экспертных методах. Обзоры методов построения интегральных индексов приведены в работах [59, 62, 119].

Современные методики расчета индекса развития человеческого потенциала (ИРЧП), индекса оценки нищеты населения (ИНН), расчета индекса развития с учетом гендерного фактора (ИРГФ), оценки экологического следа, оценки риска негативных последствий и другие методики, могут использовать множество показателей, которые обычно компонуются в несколько групп [38 – 42, 75, 131]. Например, индекс человеческого развития включает агрегатную оценку по трем индикаторам в сфере образования, экономического и социального развития, индексы ИНН и ИРГФ используют от трех до пяти индикаторов.

Методически оценка индексов чаще всего проводится на основе нормирования показателей:

$$I_i = \frac{p_i - p_{i\,\min}}{p_{i\,\max} - p_{i\,\min}}, \qquad (1.1)$$

где p_i – значения i-ого показателя для определенного объекта; $p_{i\,\min}$, $p_{i\,\max}$ – соответственно минимальное и максимальное значения этого показателя в изучаемой группе объектов; I_i – соответствующий индикатор.

Для получения значений ИРЧП необходимо рассчитать три основных параметра – индикаторы продолжительности жизни (I_1), образования (I_2) и ВВП (I_3). Для каждого из них устанавливаются общемировые минимальные и максимальные значения (планки) [38, 39].

До 2010 года интегральный индекс человеческого развития (I) вычислялся по формуле (1.2):

$$I = \sum_{i=1}^{3} \alpha_i \cdot I_i, \qquad \alpha_i = 1/3. \tag{1.2}$$

Каждый из индикаторов ИРЧП выражается величиной от нуля до единицы, и рассчитывается по формулам (1.3) – (1.5).

Индикатор продолжительности жизни определяется в виде:

$$I_1 = \frac{p - p_{\min}}{p_{\max} - p_{\min}}, \tag{1.3}$$

где p – ожидаемая продолжительность жизни в стране, регионе, горо де или районе, при этом $p_{\max}$ принимают равным 85, а $p_{\min}$ – равным 25 (лет).

Индикатор образования имеет вид:

$$I_2 = \frac{2}{3} p_1 + \frac{1}{3} p_2, \tag{1.4}$$

где p_1 – доля грамотного взрослого населения (от 15 лет и старше, доли ед.); p_2 – доля обучающихся в начальных, средних и высших учебных заведениях в возрасте от 5 до 23 лет, доли ед.

При расчете для стран мира показатель дохода (ВВП на душу населения) корректируется, так как при достижении достойного уровня развития человеческого потенциала не требуется неограниченного дохода. Поэтому при оценке соответствующего индикатора используются логарифмы дохода:

$$I_3 = \frac{\log(p) - \log(p_{\min})}{\log(p_{\max}) - \log(p_{\min})}, \tag{1.5}$$

где $p_{\max} = 40000$ дол. США по паритету покупательной способности[1], а $p_{\min} = 100$ дол. США по паритету покупательной способности.

Методика ИРЧП широко применяется при оценке человеческого потенциала разных стран [38 – 42]. После 2010 года методика расчета была

[1] Паритет покупательной способности (англ. purchasing power parity) – соотношение двух или нескольких денежных единиц, валют разных стран, устанавливаемое по их покупательной способности применительно к определённому набору товаров и услуг

изменена, в результате формула (1.2) заменена на формулу геометрического среднего $I = \sqrt[3]{I_1 \cdot I_2 \cdot I_3}$.

Аналогичным образом рассчитываются индексы нищеты населения (ИНН-1, ИНН-2). Если ИРЧП измеряет средний уровень достижений, то ИНН-1 измеряет уровень бедности населения согласно следующей формулы:

$$\text{ИНН-1} = [\frac{1}{3}(p_1^{\alpha} + p_2^{\alpha} + p_3^{\alpha})]^{1/\alpha}, \qquad (1.6)$$

где p_1 – доля населения, которая, как ожидается при рождении, не доживет до 40 лет, %; p_2 – доля неграмотного взрослого населения, %; p_3 – невзвешенное среднее арифметическое доли населения, не имеющего устойчивого доступа к улучшенным источникам воды (или доли детей с пониженной для своего возраста массой тела), %; $\alpha = 3$.

Индекс ИНН-1 используется при расчете уровня нищеты населения развивающихся стран. Методика оценки ИНН-2 позволяет измерить уровень лишений по четырем направлениям жизни людей. Индекс ИНН-2 рассчитывается по формуле (1.6), но уже для четырех индикаторов: доле населения, которая, как ожидается при рождении, не доживет до 60 лет, %; доле неграмотного взрослого населения, %; доле населения, живущего ниже черты бедности по доходу (50% от медианного скорректированного располагаемого дохода домашнего хозяйства), %; уровню застойной безработицы (в течение 12 или более месяцев), %.

Все указанные выше индексы сформулированы экспертами, исходя из общепринятого соглашения между специалистами.

При определении индексов развития городов в процессе оценок рассматриваются обычно несколько аспектов (компонентов) их развития, для чего выделяется ряд показателей. На основе данных показателей формируются безразмерные индикаторы, которые, в свою очередь, нормируют по определенной шкале. Общий индекс строится как аддитивная количественная сумма всех индикаторов с учетом задания весов, назначенных экспертами.

Например, фирмой Economist Intelligence Unit совместно с корпорацией Siemens разработана экспертная методология комплексной оценки городов. В процессе оценок рассматриваются восемь аспектов развития городов, для чего соответственно выделяются следующие

категории показателей: выбросы парниковых газов; потребление энергии; городское хозяйство; транспорт; водопользование; отходы и землепользование; качество воздуха; экологическое управление. Чтобы сравнивать данные, все показатели нормируют по шкале от 0 до 10. Общий индекс построен как количественная сумма всех категорий с учетом задания весов [131].

В свою очередь, в нормативно-методическом документе «Временные методические указания по проведению комплексной экологической оценки состояния атмосферного воздуха большого города» используется комплексный индекс загрязнения атмосферы, интегральный показатель уровня экологической опасности почв города, показатели состояния растительности и орнитофауны на территории города [27]. Суммарная комплексная оценка проводится по зависимости (1.7) по каждому из четырех приведенных выше компонентов с учетом задания весовых коэффициентов.

При оценке уровня экологической безопасности также используют интегральные показатели. Для этого на изучаемой территории вначале выявляют наиболее серьезные угрозы и проводят их ранжирование. Потом оценивают риск, где учитываются экономические убытки и смертность в следствие негативных воздействий и чрезвычайных ситуаций. Интегральные показатели для оценки угроз определяются по соотношениям [62]:

$$I = \sum_{i=1}^{m} \alpha_i \cdot I_i, \qquad (1.7)$$

где I_i – индикаторы в виде нормируемых значений показателей; α_i – весовые коэффициенты, определяемые различными методами.

При оценке экологической безопасности территорий используется 21 показатель в восьми аспектах, на основе которых рассчитываются индикаторы, характеризующие:

- развитие техносферы и опасность производств (стоимость основных фондов, количество промышленно-производственного персонала, объем продукции, изготовленной на техногенно-опасных производствах и т.д.);
- загрязнение окружающей среды (выбросы и сбросы вредных веществ в атмосферный воздух и водные объекты);

- размещение взрывопожароопасных и химически опасных производств (количество производств, численность населения, проживающего в зоне возможного поражения);
- сейсмические явления (наличие сейсмозон и численность населения, проживающего в зоне возможного поражения);
- пожары природного происхождения (наличие зон пожаров);
- радиоактивное загрязнение при потенциальных авариях на АЭС (площади зон возможного загрязнения);
- природно-ресурсный потенциал (обеспечение населения ресурсами, удельные показатели эффективности).

На основе использования зависимости (1.7) проводят сравнительный анализ природно-техногенной опасности различных природно-антропогенных территорий.

В свою очередь, нормативный документ «Критерии оценки экологической обстановки территорий для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия» [78] в области изменения среды обитания и состояния здоровья человека использует показатели в пяти аспектах состояния территорий и экологической обстановки:

- медико-демографические критерии состояния здоровья населения (16 показателей);
- загрязнение воздуха селитебных территорий (2 показателя, один интегральный);
- загрязнение питьевой воды и водоисточников питьевого и рекреационного назначения (от 5 до 15 показателей в зависимости от типа водоисточника);
- загрязнение почв селитебных территорий (7 показателей, один интегральный);
- радиационное загрязнение (1 показатель).

Данная методика в области оценки изменения природной среды использует показатели в девяти аспектах состояния территорий и экологической обстановки: загрязнение воздушной среды; загрязнение водных объектов, истощение ресурсов вод и деградация водных экосистем; загрязнение и деградация почв; изменение геологической среды;

деградация наземных экосистем; растительный мир; животный мир; биогеохимическая оценка территорий.

На основе сравнения показателей, полученных экспериментальным или расчетным путем, с критериями оценки экологической обстановки территорий определяется уровень и степень опасности того или иного события или процесса.

Все интегральные индексы оценки качества природных сред формируются аналогичным образом. Например, в постсоветских странах для соответствующей оценки широко используется, уже упоминаемый выше, комплексный индекс загрязнения атмосферы [94]:

$$КИЗА = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{C_i}{ПДК_{с.с.i}} \right)^{\beta_i}, \qquad (1.8.)$$

где n – число загрязняющих атмосферу веществ, учитываемых при определении индекса (обычно 5), C_i – среднегодовая концентрация i-ой примеси в воздухе; β_i – экспертный показатель вредности i-ой примеси, зависящий от класса опасности вещества (для веществ 1-го класса опасности равен 1,7; для веществ 2-го – 1,3; третьего – 1,0; четвертого – 0,9).

Данный индекс, как интегральный показатель, определяет не абсолютный, а относительный уровень загрязнения атмосферного воздуха изучаемой местности. Согласно принятой классификации по показателю КИЗА выделяют четыре категории опасности: класс нормы $(КИЗА \le 5)$, класс риска $(5 < КИЗА \le 8)$, класс кризиса $(8 < КИЗА \le 15)$ и класс бедствия $(КИЗА > 15)$. Таким образом, показатель *КИЗА* дает экспертную оценку уровня опасности загрязнения воздуха.

В Беларуси после 2006 года указанный индекс практически не используется для оценки загрязнения атмосферы; сейчас там применяют суммарный показатель загрязнения атмосферного воздуха P [59]. В то же время в других странах СНГ использование *КИЗА* продолжается. В частности, в России и Украине интегральная оценка состояния воздушной среды по-прежнему базируется на расчете индекса загрязнения атмосферы (*ИЗА*), который связан методически с *КИЗА* [59, 94].

В Украине, в соответствии с нормативным документом ДСП-201-97 [44], введенным в действие МОЗ Украины в 1997 году, оценка загрязнения

атмосферного воздуха проводится также с учетом кратности превышения показателя загрязнения *ПЗ* относительно нормативного значения предельно допустимого загрязнения *ПДЗ*. Индекс *ПЗ* рассматривается уже как относительный интегральный критерий оценки загрязнения атмосферного воздуха, который характеризует интенсивность и характер совместного влияния всей совокупности присутствующих в нем вредных примесей. Оценка уровня загрязнения атмосферного воздуха проводится путем сопоставления показателя загрязнения одним веществом или суммарного показателя загрязнения смесью веществ с показателем *ПДЗ,* который нормируется, исходя из пяти диапазонов опасности. Из расчета значений *ПЗ* определяется уровень и степень опасности загрязнения воздуха. Если значение $ПЗ \leq 1{,}0\ ПДЗ$, то степень опасности загрязнения воздуха считается безопасной; если же $1{,}0\ ПДЗ < ПЗ \leq 2{,}0\ ПДЗ$, то степень опасности загрязнения – слабо опасной; если $2{,}0\ ПДЗ < ПЗ \leq 4{,}4\ ПДЗ$ – умеренно опасной; если $4{,}4\ ПДЗ < ПЗ \leq 8{,}0\ ПДЗ$ – опасной; и, наконец, если $ПЗ > 8{,}0\ ПДЗ$ – степень опасности загрязнения воздуха является очень опасной. Величина *ПДЗ* определяется согласно ДСП-201-97 [44] с учетом перечня веществ, присутствующих в воздушной среде, а также экспериментально определенных и утвержденных в установленном порядке коэффициентов комбинированного действия вредных веществ.

Показатель загрязнения рассчитывается по формуле:

$$ПЗ = \sum_{i=1}^{n} \frac{ПЗ_i}{K_i}, \quad ПЗ_i = \frac{C_i}{ПДК_{с.с.i}}, \tag{1.9}$$

где K_i – значения весовых коэффициентов, которые учитывают класс опасности i-ого вещества и соответственно равны: для веществ 1-го класса опасности – 0,8; 2-го класса опасности – 0,9; 3-го класса опасности – 1,0; для веществ 4-го класса опасности – 1,1.

Показатель *ПЗ* дает оценку уровня опасности загрязнения воздуха, однако норма кратности превышения *ПДЗ* введена временно, процесс накопления новых данных идет очень медленно и субъекты государственного мониторинга данную норму используют существенно реже, чем комплексный индекс *КИЗА*.

Похожим образом, но с учетом специфических особенностей экспертных методик, построены другие индексы для оценки загрязнения

атмосферного воздуха: индекс качества атмосферного воздуха *AQI* (Air Quality Index), *AQHI* (Air Quality Health Index), общий индекс качества воздуха *CAQI* (Common Air Quality Index), индексы *ATMO*, *BELATMO*, *API*, *Z*, *Q*, *HI*, *H* и т.д. [44, 59, 87, 93 – 95, 113].

При оценке загрязнении поверхностных вод часто используется индекс загрязнения воды [8, 9]:

$$I_{зв} = \frac{1}{6} \cdot \sum_{i=1}^{6} \frac{C_i}{ПДК_i}, \qquad (1.10)$$

где C_i – концентрация азота аммонийного, азота нитритного, нефтепродуктов, фенолов, растворенного кислорода, а также $БПК_5$; $ПДК_i$ – предельно-допустимые концентрации содержания загрязняющих веществ в воде, согласно национальных норм.

С учетом специфических особенностей экспертных методик аналогично построены также и другие индексы для оценки загрязнения поверхностных и подземных вод: индекс качества воды [8, 9]; формализованный суммарный показатель химического загрязнения $(ПХЗ-10)$; интегральный показатель, учитывающий способность загрязняющих веществ накапливаться в донных отложениях $(КДА)$ и др.

В свою очередь, при загрязнении почв используется индекс опасности вида (1.10), при этом оценивается уровень загрязнения почв химическими веществами: кобальтом, марганцем, медью, нитратами, сульфатами, ртутью, свинцом, фосфором, хромом, цинком, пестицидами и т.д. Часто данный индекс называют суммарным показателем химического загрязнения почв (Z_c).

При оценке биоразнообразия территорий применяется множество различных индексов, которые отличаются широким методическим разнообразием. Известно, что биоразнообразие является характерной чертой жизни на земле, оно определяет возможность существования и функционирования как отдельных экосистем, так и биосферы в целом. Обычно в количественной оценке биологическое разнообразие – это показатель, характеризующийся числом видов живых организмов, обитающих на единице площади суши или объёма водоёма.

Из всех известных индексов разнообразия (которых насчитывается несколько десятков) видовое богатство (S) – самый популярный. Он

определяет число видов, проживающих на изучаемой территории. Однако тенденция к использованию мер, учитывающих обилие видов, привела к широкому распространению индекса Шеннона. Достаточно известен также индекс Симпсона. Существенно реже применяются индексы Маргалефа, Макинтоша и Бриллуэна, Бергера-Паркера. Величины индексов разнообразия часто коррелируют друг с другом.

Индекс Симпсона определяют по формуле:

$$D = 1 - \sum_{i=1}^{k} \left(\frac{n_i}{N} \right)^2 , \qquad (1.11)$$

где n_i – средняя численность или биомасса отдельных видов, N – общая средняя численность или биомасса всех видов. В свою очередь, индекс Шеннона определяется по формуле:

$$H = -\sum_{i=1}^{N} p_i \ln p_i , \qquad (1.12)$$

где p_i – относительное обилие i-ого вида; N – общее число видов в выборке.

Несмотря на то, что индексы биоразнообразия используются достаточно широко, многие авторы считают, что индикативная оценка биоразнообразия в пространстве видов в значительной мере некорректна, в первую очередь потому, что никак не учитывается морфологическое, функциональное, экологическое сходство/различие между самими видами. Часто индексы разнообразия основываются на экологически сомнительных концепциях и расчетных моделях [96, 115]. Эти выводы по использованию комплексных индексов при оценки состояний систем достаточно важны, т.к. научные исследования в области оценки биоразнообразия продвинулись существенно дальше, чем, например, в оценке экологического, человеческого или социально- экономического развития.

В целом, все упоминаемые выше комплексные и интегральные показатели представляют собой расчетные величины, которые определяются на основе экспертных зависимостей и приняты в качестве тех или иных нормируемых величин.

Анализ всего спектра исследований в области комплексной оценки природно-антропогенных систем выполнен в известных работах [7, 12, 14, 16, 59, 62, 105, 119]. Авторы отмечают, что в данной области существует

целый ряд нерешенных методологических проблем. Причем наиболее существенные научные проблемы лежат в области теории комплексной оценки. Именно в области теоретических исследований существует несколько проблем, которые не позволяют многочисленным научным идеям превратиться в общепринятые теории.

Во-первых, часто изначально формулируются качественные теоретические концепции, которые практически невозможно формализовать и для которых нельзя получить количественные соотношения. Во-вторых, очень часто теоретические гипотезы высказываются на основе поверхностного обобщения данных без проверки адекватности моделей. Все это приводит к большому количеству частных моделей, которые чаще всего несут в себе субъективное содержание. В-третьих, при построении моделей не используются базы данных показателей о состоянии систем, что, в первую очередь, связано со сложностью сбора информации и необходимостью работы с многомерными массивами данных.

Поэтому на фоне громадного количества аналитических и оценочных докладов, известных и научно-обоснованных моделей и комплексных оценок состояния и развития природно-антропогенных систем очень мало. Сегодня научное направление комплексной оценки систем формируется в большей степени как описательная наука. По утверждению авторов статьи [96] за последние 30 лет не появилось ни одной сколько-нибудь заметной публикации, вносящей что-то новое в основные концепции или фундаментальные законы экологических наук. По их словам экологический мир на пороге научной революции, связанной с созданием объективной теории, однако пути создания такой теории еще явно невидны.

Таким образом, на данном этапе развития научных исследований следует признать, что в области комплексного анализа природно-антропогенных систем не существует фундаментальной теории, которая бы характеризовала состояние, изменение и развитие таких систем, исходя из оценки множества показателей. Методология фундаментальной теории в области комплексной оценки природно-антропогенных систем может быть сформулирована только на основе использования объективного подхода, проведения междисциплинарных исследований и установления количественных закономерностей.

1.3. Оценка рисков и системные модели в комплексной оценке

Последние годы быстро развивается область междисциплинарных исследований, основанная на применении естественнонаучных методов в биологических, экологических и социальных науках. В этом плане следует отметить научные направления, связанные с системным анализом состояний и оценкой опасности сложных систем [2, 3, 11, 12,14, 16, 21, 22, 48, 62, 110, 113, 115, 119], энергоэнтропийной концепцией безопасности [7, 21, 62], методами математического моделирования опасностей и угроз [13, 21, 49, 51 – 53, 56, 62, 66, 80, 112], методологией анализа риска [51, 55, 62, 87, 93, 102, 103, 108, 136, 140, 144, 145, 148 – 150], методами системной динамики применительно к социальным и экологическим процессам [4, 7, 49, 52, 53, 122], методологией оценки устойчивости сложных систем, основанной на теории неравновесной термодинамики [62] и др.

Сегодня поиску системообразующих факторов и формулировке общесистемных принципов моделирования объектов и явлений различной природы уделяется значительное внимание. Системному анализу состояния и оценке опасности сложных систем посвящены работы многих авторов [12, 14, 21, 22, 36, 56, 62, 110, 119]. Данное направление исследований связано с разработкой логико-вероятностных моделей состояния и безопасности систем, ситуационно-событийным подходом при описании процессов, структурно-функциональными методами моделирования объектов и явлений, разработкой различных гипотетических системных моделей и т.д. В прикладном аспекте системный подход – это сочетание структурного, функционального и комплексного анализа объектов, использования средств моделирования и методов системного управления. При системном анализе безопасности систем часто применяют бинарно-множественный подход (метод Q-анализа), когда между двумя множествами величин (например, между управляющими или управляемыми факторами, или между внедряемыми мероприятиями и угрозами и т.д.) ищется соответствие с использованием различных математических методов [62]. Применяются также логико-вероятностные методы, имитационные, агентные, ситуационно-событийные и гибридные модели, которые получили значительное

распространение в связи с развитием программного обеспечения для компьютерного моделирования сложных систем. С этой целью используют различные программные продукты для моделирования систем: MathCAD, Maple, Mathematica, Matlab, LabView и многие другие.

Последнее время разработаны новые программные платформы для моделирования различных объектов и процессов, основанные на использовании специфических системных моделей применительно к данным, характеризующим те или иные сложные системы. Например, компания Palantir в своих продуктах применяет онтологические модели данных. Под такими моделями понимается логический подход к формализации знаний в определенной предметной области в виде схемы, отражающей структуру данных, состоящую из объектов, поделенных на классы, связей между ними, а также из правил и ограничений, принятых в этой области. Технологически подобные продукты объединяют методы интеграции и представления разнородных данных по общей форме в одной базе данных, используют поисковые механизмы и разные способы составления запросов, применяют различные аналитические алгоритмы (генетические алгоритмы, эвристические алгоритмы поиска, нейронные алгоритмы, статистические методы и т.д.). Это позволяет предложить эксперту простой в использовании инструмент для анализа данных. Окончательные выводы по решению задачи принимаются экспертом или группой экспертов.

Компания Quid применяет в известном продукте анализа данных Quid-модель изучаемых систем, получившую название «техноценоза» и построенную с учетом качественной модели развития технических и технологических решений. В России термины «техноценоз» и ценологический подход к исследованию сложных технических систем предложены Б.И. Кудриным [67]. Его теория основана на аналогиях между развитием техники и живой природы. Quid-модель позволяет вести научно-техническое прогнозирование и поиск исполнителей для решения задач в сфере развития технологий, используя патентные данные ведущих стран мира и информацию открытых научно-технических баз данных.

Компания Google формирует модели данных путем структурирования всего информационного поля имеющихся данных о

состоянии и развитии тех или иных систем. Данный проект предполагает использование поисковика третьего поколения, который может вести поиск и отражать связи между объектами и их характеристиками, осуществляет структурирование всего информационного поля поиска по интересующим событиям, мнениям и реакциям людей на эти события и дает возможность исследовать явные и латентные связи, а также анализировать тренды и вести оценку отношений и связей на информационном поле.

Недостатками системного анализа природно-антропогенных систем является гипотетическое описание структуры и функций систем, слабая связь системных методов исследования с особенностями и спецификой задач прикладной области, отсутствие возможности учета фундаментальных закономерностей изучаемых систем, общая сложность получаемых моделей и т.д. Основным существенным недостатком является необходимость полного гипотетического представления структуры, функций, связей и отношений, характеризующих изучаемую систему. Такую работу можно провести для технических систем, а для природно-антропогенных систем это часто невыполнимо.

Направление исследований, охватываемое методами математического моделирования угроз и опасностей, связано с описанием поведения систем на основе систем дифференциальных уравнений:

$$\frac{dp}{dt} = F(t, p, A), \tag{1.13}$$

где $p = (p_1, p_2, ..., p_n)$ – n-мерный вектор показателей, характеризующих состояние системы; t – время; A – вектор влияющих параметров.

Уравнения (1.13) получают на основе различных балансовых соотношений для вещества, энергии, импульса, стоимости, различных аддитивных величин (например, числа особей) [62, 80, 112]. В этой области развиваются детерминированные и стохастические методы моделирования процессов и ситуаций, методы междисциплинарного моделирования сложных систем [62], энергоэнтропийные методы описания опасных процессов и т.д. Ряд работ связан с применением при анализе данных в общественных явлениях методов статистической обработки информации и некоторых видов математических и имитационных моделей [6, 7].

Данная область охватывает также множество других подходов, теорий и методов, среди которых можно выделить: методы нелинейной динамики, синергетики, теории катастроф. Данные методы, несмотря на наличие теоретического обоснования, в практике комплексной оценки и анализа безопасности систем распространены слабо, так как они отличаются существенным смещением всей методологии исследований в область теории и недостаточно ориентированы на работу со статистическими и опытными данными. Это связано с проблемами аналитического описания природно-антропогенных систем, отличающихся сложными причинно-следственными связями и спецификой физико-химических и социально-экономических процессов. Как следствие подобные модели имеют низкую адекватность и слабо идентифицируются по опытным данным.

Наиболее широкое распространение при комплексной оценке и анализе безопасности природно-антропогенных систем получила методология анализа риска [21, 51, 55, 62, 72, 77 – 79, 81, 87, 93, 102, 103, 136, 140, 144, 145, 148 – 150]. Данное направление отличается наличием определенных теоретических обоснований, достаточно развитой феноменологической[1] базой и тесной связью с опытом и статистическими данными наблюдений. Методология анализа рисков применительно к природно-антропогенным и биологическим системам бурно развивается [21, 55, 62, 72, 77, 78, 81, 87, 93, 103, 136,140, 144, 149, 150]. Имеются примеры использования методов анализа риска в политических науках, экономике и финансовой деятельности, энергетике, страховании жизни, строительстве, промышленной безопасности, геологии, военном деле, биологии, медицине и т.д. Обзор методов, моделей и средств оценки рисков в различных прикладных областях приведен в известной литературе [21, 51, 62, 72, 87, 103, 108, 144]. В данной области работает множество ученых, исследователей и практиков, имеется много монографий, статей и диссертаций на тему анализа рисков. Вся область оценки рисков развивается преимущественно как описательная наука, позволяющая

---

[1] Феноменологический (*нем. Phänomenologie – учение о феноменах*) - конструктивный подход к исследованию процесса или явления на основе имеющихся опытных данных, позволяющий получить результат с необходимой точностью без объяснения истинных причин явления.

устанавливать закономерности в самых различных прикладных областях на основе обширного опытного материала. В настоящее время насчитывается несколько методологий и десятки универсальных моделей риска, которые применяются в разных предметных областях [21, 51, 62, 72, 87, 103].

Основные проблемы в области оценки рисков связаны с исключительным многообразием изучаемых систем, проблемами классификации угроз и рисков в предметных областях, неопределенностью и неоднозначностью многих данных, которые характеризуют состояния биологических, экологических, технических и социальных систем, широким фронтом развития специальных теорий и математических моделей, направленных на описание рисков, изучением вероятностей слишком большого множества сложных опасных событий и т.д. В настоящее время пока не существует общей методологии оценки риска, которая могла бы быть использована в различных предметных областях, т.к. такая методология связана с комплексным анализом систем по вероятностным характеристикам.

Методы системной динамики применительно к социальным и экологическим процессам позволяют исследовать поведение сложных систем во времени и в зависимости от структуры элементов системы и взаимодействия между ними. Работы Дж. Форрестера, П. Анохина, Р. Уиттекера и др. внесли значительный вклад в технологию прикладного математического и компьютерного моделирования сложных социально-экономических систем, построение моделей биологических и экологических систем [15, 110, 112]. Данное направление моделирования систем связано с использованием системного анализа и естественнонаучных методов в описании живой и неживой природы и позволяет получать модели для решения прикладных задач. Первые работы Дж. Форрестера по системной динамике были посвящены построению моделей развития городов и глобальным моделям мировой динамики [112]. За последние 30 лет методы системной динамики получили распространение при описании сложных социально-экономических систем. Это направление в моделировании сложных систем связано с системным анализом и общей теорией систем и отражено в работах многих авторов [15, 22, 36, 66, 110].

Последние теоретические разработки в области системной динамики [7] позволяют разрабатывать количественные модели, которые могут быть реализованы с использованием вероятностных принципов обработки информации и дают возможность предложить способы формирования математических описаний опытных данных, содержащихся в базах данных. В области мониторинга природных и антропогенных систем накоплены большие базы данных, позволяющие вести речь об установлении феноменологических закономерностей и разработке комплексных моделей систем и объектов. Указанное направление исследований уже вполне позволяет поставить задачу оценки вероятностей состояний систем, исходя из сложных событий одновременного наблюдения нескольких показателей, характеризующих различные природно-антропогенные системы. Следует также отметить, что исследования в этом направлении связаны с распространением феноменологических методов естественных наук в область экологических и социальных процессов и явлений. Считаем, что это одно из перспективных направлений изучения природно-антропогенных систем, которое имеет теоретическое обоснование и тесно связано со структурно-логической схемой построения моделей, которая принята в физике сплошных сред и термодинамике, и методологией оценки устойчивости сложных систем, основанной на теории неравновесной термодинамики [7, 62]. Еще в 1986 году А. Гухманом была высказана идея, что модели энтропии в термодинамике могут быть распространены на взаимодействия любого рода и системы самой различной природы [33]. Практически А. Гухманом было предложено распространить феноменологический метод термодинамики и логику ее моделирования на другие области знаний. В работах [4 – 7, 48, 49, 52, 53, 62, 122, 123, 152] данное направление было развито, что позволило внести вклад в технологию моделирования сложных социально-экономических систем и построение моделей биологических систем.

В связи с тем, что в сфере изучения развития городов, регионов и стран, в области загрязнения окружающей среды, оценки воздействий на биологические объекты накоплен огромный экспериментальный материал, то вполне возможно применение феноменологических методов анализа и описания данных, полученных в процессе наблюдений или опыта.

Феноменология может дать возможность разработать теорию опасности и риска для природно-антропогенных систем. Для этого существует несколько причин:

- имеются обширные массивы опытных данных в виде временных рядов показателей природно-антропогенных систем и данные о негативных воздействиях факторов опасности на различные объекты. Сегодня не так уж много предметных областей, связанных с опасностями, где имеются подобные структурированные количественные данные;
- существуют феноменологические закономерности и зависимости, описывающие опытные данные и возможность применения апробированных естественнонаучных методов к совокупности результатов наблюдений или опыта в области изучения природно-антропогенных систем;
- имеются реальные примеры разработки многомерных системодинамических моделей природных, экологических, антропогенных, технологических и социальных систем, состояния которых описываются комплексом различных показателей. Подобные модели позволяют предложить аналитические методы комплексной оценки систем, исходя из вероятностного анализа имеющихся опытных данных [4 – 6, 48, 49, 52, 53, 62, 122, 123, 152].

Все это создает условия для построения теории опасности и риска применительно к природно-антропогенным системам, где наблюдаются процессы социально-экономического, экологического и техногенного развития, а также изменения, связанные с антропогенными воздействиями.

1.4. Выводы и некоторые актуальные задачи комплексной оценки

В данной главе изучено состояние вопроса в области моделирования, комплексной оценки и анализа рисков природно-антропогенных систем, выполнена классификация и систематизация некоторых их видов и дана характеристика показателей и индикаторов для исследования таких систем. Проведенный обзор информации по изучаемой проблеме позволяет сделать следующие выводы.

В настоящее время существует общепринятое определение и классификация природно-антропогенных систем. Говоря о состоянии природно-антропогенных и урбанизированных систем, обычно подразумевают социально-экономическую характеристику систем, загрязнение природных сред, наблюдаемый уровень антропогенного воздействия на природу и человека, а также антропогенные характеристики и видовое биоразнообразие, свойственное таким системам. В свою очередь, под состоянием системы понимают совокупность ее показателей, характеризующих структуру и процессы функционирования систем. Каждый объект в природном, биологическом, антропогенном и техногенном отношении может характеризоваться множеством показателей, свойственным только данному виду природно-антропогенных систем. Для характеристики таких систем в мировой практике разработаны комплексы показателей и индикаторов, которые объединяются в рамках 10 – 15 компонентов (аспектов или групп) развития систем, в каждый из которых может входить от 5 до 20 показателей. Выбранные группы показателей на основе соглашения принимаются к использованию научным сообществом для характеристики тех или иных видов природно-антропогенных систем. Однако при комплексной оценке для расчета интегральных показателей чаще всего используются одновременно не более 5 – 8 показателей.

Таким образом, сегодня сформулированы основные показатели, характеризующие состояние и развитие природно-антропогенных систем, которые используются при комплексной оценке в области социально-экономического, экологического и техногенного развития различных систем. Из анализа совокупности показателей для комплексной оценки и их информационной значимости следует ряд нерешенных методических проблем, связанных с корректным использованием показателей и индикаторов:

- слабо изучен вопрос о том, как из совокупности в 50 – 100 показателей выбирать исходные показатели для оценки развития систем. Существуют только общепринятые перечни показателей для различных природно-антропогенных систем, а вопрос об их значимости является

открытым, и каждый автор руководствуется собственными соображениями и допущениями в данном вопросе;

- существует несколько способов нормировки показателей, причем практически всегда стремятся провести нормировку так, чтобы получить диапазон изменения индикатора от 0 до 1 или, например, от 0 до 10. То есть широкая область изменения показателей преобразуется часто в узкий конечный диапазон, что, для большинства случаев, является оптимальным решением вопроса;
- построение моделей природно-антропогенных систем непосредственно связано с обработкой информации применительно к многомерным пространствам показателей, характеризующим такие системы. При этом задача моделирования систем практически сводится к построению моделей описания данных применительно к проблемно-ориентированным базам данных.

Следует также отметить, что в связи с большим количеством изучаемых природно-антропогенных систем, а также множеством разноплановых показателей, сегодня нет общепринятых представлений о том, как выбирать атрибутивные (наиболее значимые, описывающие объект) показатели для таких систем. В связи с этим необходима разработка методов, в которых возможен выбор любых совокупностей показателей для комплексной оценки и последующей оценки их значимости.

Обзор методов комплексной оценки природно-антропогенных систем и урбанизированных территорий показал, что методическую основу составляет комплекс достаточно простых интегральных оценок, основанных на использовании различных экспертных методов и зависимостей. Приведены примеры различных интегральных индексов, которые применяются при комплексной оценке человеческого развития, анализе состояния и развития городов, регионов, а также стран мира, в экологической безопасности, при характеристике уровня загрязнения окружающей среды, оценке биоразнообразия и т.д.

В результате выполненного анализа отмечено, что в области комплексной оценки существует целый ряд нерешенных методологических проблем:

- существующие методы комплексной оценки в значительной мере некорректны и субъективны, в первую очередь потому, что используют методологию экспертных подходов и никак не учитывают фундаментальные закономерности природно-антропогенных систем. Все практически сводится или к множественным пространным описаниям различных аспектов и компонентов систем или к использованию индексов, построенных по «соглашению» на принципе аддитивности индикаторов и с учетом весов показателей, а также сравнению систем на основе этих индексов;
- множество комплексных индексов, построенных на основе гипотетических и экспертных методов, не адаптированы к данным наблюдений, обладают слабой устойчивостью к изменениям данных, отличаются сильной зависимостью показателей, используемых для оценки;
- модели для комплексной оценки основаны на весьма частных и узких гипотезах и не могут служить фундаментом для формально строгих теорий. При изучении природно-антропогенных систем практически не применяются и не проверяются на опытных данных фундаментальные гипотезы, получившие широкое распространение в естественных науках: различные общесистемные принципы, уравнения состояния систем, законы сохранения, допущения, которые бы приводили к формулировке дифференциальных уравнений и т.д.;
- приходится констатировать, что сколько-нибудь строгих методов комплексной оценки, отличающихся высокой обоснованностью и формализмом теории, до настоящего времени не выработано. Многие методы при применении к одному объекту исследования вообще могут давать несопоставимые результаты, что указывает на нарушение основного принципа науки о воспроизводимости результатов;
- теоретические работы по комплексной оценке в области экологических наук часто сводятся к гипотезам и обобщениям, оторванным от реальной статистической базы и систематического изучения опытных данных;
- методы и средства, которые применяются при анализе состояния и развития городов, регионов и стран, используют весь набор традиционных экспертных методов и не позволяют достоверно

прогнозировать развитие объектов на среднесрочную и дальнесрочную перспективы.

Развитие системных моделей в комплексной оценке идет по пути разработки логико-вероятностных, имитационных, агентных, ситуационно-событийных и гибридных моделей объектов. Параллельно с этим происходит быстрое развитие программного обеспечения для компьютерного моделирования сложных систем.

Наблюдается также тенденция разработки принципиально новых системных моделей применительно к данным, которые характеризуют те или иные сложные системы: онтологических, ценологических и системодинамических моделей данных.

При математическом моделировании состояний, угроз и опасностей используются также методы описания поведения систем на основе систем балансовых дифференциальных уравнений. В данной области развиваются детерминированные и стохастические методы моделирования процессов и ситуаций, методы междисциплинарного моделирования сложных систем, энергоэнтропийные методы описания опасных процессов и т.д. После первых несомненных успехов моделирования различных сложных систем, указанное направление исследований столкнулось с рядом сложностей. Это связано с проблемами аналитического описания природно-антропогенных систем, отличающихся сложными причинно-следственными связями и спецификой физико-химических и социально-экономических процессов. Как следствие, подобные модели имеют низкую адекватность и слабо идентифицируются по опытным данным.

Наиболее широкое распространение при комплексной оценке и анализе безопасности природно-антропогенных систем получила методология анализа риска. Это направление отличается наличием определенных теоретических обоснований, достаточно развитой феноменологической базой и тесной связью с опытом и статистическими данными наблюдений. Однако данное направление исследований развивается преимущественно как описательная наука, позволяющая устанавливать закономерности в самых различных прикладных областях на основе обширного опытного материала и получения эмпирических зависимостей для риска, поэтому пока не существует общей методологии

оценки риска, которая могла бы быть использована в различных предметных областях. Кроме того, методология оценки рисков тесно связана с комплексным анализом систем по вероятностным характеристикам, поэтому ей присущи все те недостатки, которые характерны для анализа систем по комплексу показателей.

Одно из перспективных направлений комплексной оценки природно-антропогенных систем связано с распространением феноменологических методов естественных наук в область экологических и социальных исследований. В литературе имеются реальные примеры разработки многомерных системодинамических моделей природных, экологических, антропогенных, технологических и социальных систем, состояния которых описываются комплексом различных параметров. Все это указывает на реальность построения теории опасности и риска для природно-антропогенных систем, где наблюдаются процессы социально-экономического, экологического и техногенного развития, а также изменения, связанные с антропогенными воздействиями.

В целом, как показал выполненный анализ, существует определенный перечень актуальных задач комплексной оценки природно-антропогенных систем. В области теории такими задачами является:

- совершенствование естественнонаучных методов исследований в экологическом, общественном и человеческом развитии;
- изучение принципов и методов комплексной оценки и оценки рисков, связанных с анализом состояния и предсказанием развития природно-антропогенных и урбанизированных систем на основе применения вероятностных методов и использования баз данных статистической информации;
- разработка моделей состояния и развития городов, регионов и стран, а также научно-практических методов их многопараметрического ранжирования, отличающихся применением объективных научных подходов при анализе информации;
- создание новых прогностических подходов, применяющих феноменологические методы анализа статистических данных;

- развитие методов стратегического прогнозирования и комплексной оценки в политических, экономических, социальных и разведывательных целях.

Важными прикладными задачами комплексной оценки систем являются:

- развитие прикладных методов комплексной оценки при научном и технологическом прогнозировании в сфере государственной, общественной и экологической безопасности, оценке социально-экономического развития и состояния общества по различным аспектам, а также при изучении качества жизни граждан;
- совершенствование методик комплексного мониторинга развития страны и информационно-статистических наблюдений за показателями и характеристиками национальной безопасности;
- изучение состояния и тенденций развития стран, регионов и городов, оценка особенностей и уровня налоговых поступлений в группах однородных субъектов налогообложения, изучение поведения социальных групп и различных категорий людей, исходя из анализа однородных значимых событий и среднестатистических особенностей;
- создание новых методик оценки различных индексов и определения рейтингов развития.

Таким образом, из вышеизложенного видно, что перспективы развития комплексной оценки в научном и прикладном плане достаточно обширны, т.к. связаны с новыми направлениями исследований теории систем и системной динамики.

РАЗДЕЛ 2

ОБЪЕКТЫ, ГИПОТЕЗЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Принципы, гипотезы и методы построения теории комплексной оценки на основе феноменологического анализа данных

Принятые методы исследования носят междисциплинарный характер и направлены на решение фундаментальной проблемы науки, связанной с использованием при комплексной оценке природно-антропогенных систем и изучении их состояний естественнонаучных методов. Моделирование процессов для таких систем предлагается основывать на феноменологических подходах анализа и описания статистических данных, собранных в процессе наблюдений или опыта.

Данное направление в науке имеет большое значение, так как позволяет в общем случае предложить объективные методы исследования многомерных природно-антропогенных систем, отличающихся наличием биотических и абиотических компонентов. Сегодня в биологии, экологии, экономике, урбанистике и глобалистике много внимания уделяется разработке универсальных методов моделирования. На повестке дня стоит вопрос создания новой методологии прикладного моделирования, которая позволяла бы использовать общую логическую схему анализа данных и построения моделей по отношению к системам, характеризующимся совокупностью самых разных показателей. Несмотря на множество исследований, существенного прогресса в этой области пока не наблюдается.

Для решения представленной научной задачи необходимо разработать систему принципов, методов и средств феноменологического анализа данных для массивов эмпирической или статистической информации, отражающей в виде временных рядов процессы изменения и развития природно-антропогенных систем. Феноменологические модели могут быть ориентированы на описание массивов структурированной количественной информации в самых разных прикладных областях. Результаты работы получены с использованием методов теории систем и

системной динамики, а также логических принципов и феноменологических методов, которые используются в термодинамике и в физике сплошных сред [6, 7, 48, 49, 52, 122, 123, 152].

Обычно под природно-антропогенной системой понимают функционирующую как единое целое совокупность природных и искусственных объектов, которые взаимодействуют между собой. В данном исследовании в качестве природно-антропогенной системы будем рассматривать некоторую совокупность однотипных объектов природно-антропогенного вида, которые можно считать объектами одного класса, например, предприятия, города, населенные пункты, экосистемы, страны и т.д., и которые состоят из биотических и абиотических компонентов. Это позволяет формировать общие массивы опытных данных для множества природно-антропогенных объектов одного класса и осуществлять структурирование исходной информации по одной форме.

Основная идея теоретического подхода заключается в разработке новых методов и средств комплексной оценки и многопараметрического ранжирования природно-антропогенных систем, статистическая информация о которых может быть представлена в виде таблично-временных массивов структурированных данных, характеризующих процессы изменения и развития таких систем. Подобные данные имеют структуру таблиц в виде матриц «объекты-показатели», причем множество таблиц (t) упорядочено по времени, например, годам, месяцам и т.д.

В качестве объектов исследования различных видов природно-антропогенных систем могут выступать страны, области, районы, города, небольшие населенные пункты, природно-промышленные комплексы, отдельные территории (в том числе и природно-заповедные зоны, водные и лесные объекты), крупные предприятия, техногенные объекты, например, гидротехнические сооружения, отвалы, места складирования отходов и т.д. В качестве показателей и индикаторов природно-антропогенных систем могут использоваться самые различные величины. Например, в группе показателей, характеризующих загрязнение природных сред и наблюдаемый уровень антропогенного воздействия на природную среду и человека, это могут быть концентрации вредных веществ в атмосферном воздухе, поверхностных водах и почвах, объемы

выбросов и сбросов загрязняющих веществ, выбросы парниковых газов, количество используемых пестицидов, объемы израсходованной свежей и оборотной воды, площади сельскохозяйственных и орошаемых земель, количество накопленных отходов, объемы добычи полезных ископаемых, потребления и производства энергии, площади нарушенных земель и т.д. (обычно до $30-40$ основных показателей). В качестве социально-экономических показателей состояния и развития природно-антропогенных систем могут выступать следующие индикативные величины: численность населения, рождаемость и смертность, показатели ВВП и ВНП (ВРП), доля городского населения, показатели структуры экономики и промышленности, расходы домашних хозяйств, уровень безработицы и миграции, младенческая и детская смертность, число убийств и тяжких преступлений, число заболеваний туберкулезом, продолжительность жизни, уровень грамотности населения и т.д. Количество основных социально-экономических показателей может достигать до сотни величин. В качестве показателей и индикаторов биологического разнообразия природно-антропогенных систем могут применяться характеристики окружающей среды, показатели, характеризующие распространение видов, доля охраняемых территорий, лесных и лесопокрытых территорий, количество основных и доминантных видов, индексы биоразнообразия и т.д. (обычно до 10 – 15 показателей).

Исходя из сказанного выше, для определенного объекта каждый показатель в таблично-временном массиве данных будет представлен временным рядом из опытных точек в количестве (t), которые задаются с определенным лагом (год, месяц и т.д.). Структура таблично-временных данных, характеризующих природно-антропогенные системы, в виде «объекты-показатели-время» показана на рисунке 2.1.

В целом отметим, что в данном случае при комплексной оценке возможно использование любых статистических данных, характеризующих социально-экономический, промышленный, экологический, научно-технологический, военный, ресурсный или культурный потенциал изучаемой территории.

Сформулируем основные принципы, подходы и гипотезы, которые предполагается использовать при выполнении исследований [1, 5, 7, 48, 52, 53].

Предположим, что определенная группа однотипных объектов некоторой природно-антропогенной системы в количестве m характеризуется n статистическими показателями или индикаторами $p_1, p_2, ..., p_n$. Перечень атрибутивных показателей $p_к$ $(k = 1, ..., n)$ для моделирования определяется сложившимися в научном сообществе представлениями о поведении изучаемых объектов, корреляционным анализом данных или другими методами установления наиболее значимых переменных. Тогда в n-мерном пространстве координат H^n, где $p = (p_1, p_2, ..., p_n)$, $p_k \in H^n$, каждому изучаемому объекту будет соответствовать n значений координат p_k. Определим H^n как пространство наблюдаемых состояний для изучаемой группы объектов.

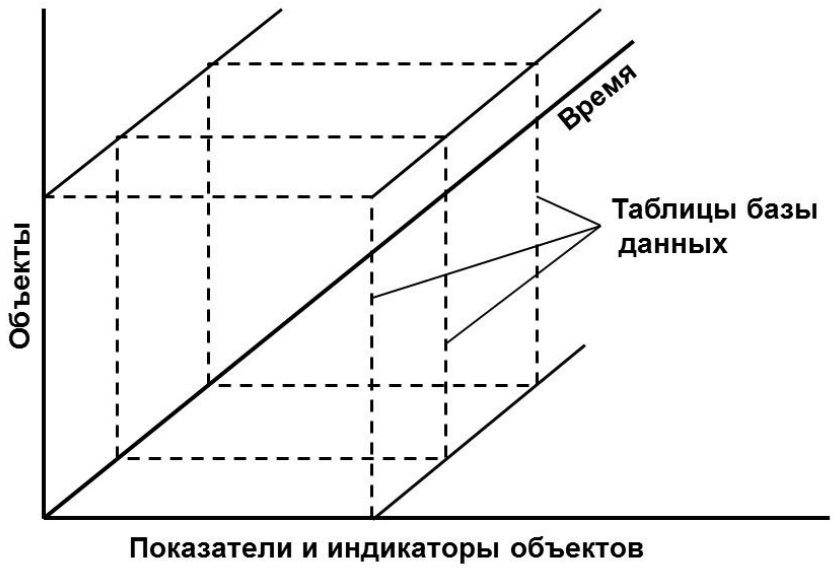

Рисунок 2.1. – Структура таблично-временных массивов статистических данных

Таким образом, каждый объект в определенный момент наблюдения находится в некотором состоянии и характеризуется совокупностью показателей $p_1, p_2, ..., p_n$. Состояния объектов изменяются с течением времени. Подобный общепринятый подход позволяет определить *состояние объекта* как совокупность его наблюдаемых показателей, которые формируются под действием условий окружающей среды в конкретный момент времени. Поэтому, состояние любого объекта в n-мерном пространстве в каждый момент времени будет отображаться

точкой $M = M(p_1, p_2, ..., p_n)$, будем называть ее фигуративной точкой. Тогда процесс изменения состояния объекта во времени характеризуется кривой в n-мерном пространстве, которая описывается фигуративной точкой $M = M(p_1, p_2, ..., p_n)$ в этом пространстве.

Состояния каждого объекта могут характеризоваться не только показателями $p_1, p_2, ..., p_n$, но и некоторыми наблюдаемыми событиями, которые отражают характерные изменения в изучаемых объектах природно-антропогенной системы. Поэтому, рассмотрим одно или несколько характерных событий A_i и определим, что состояние определенного объекта в заданный момент времени будет характеризоваться величинами $p_1, p_2, ..., p_n$, которые в совокупности отображаются фигуративной точкой M_i, а также данным наблюдаемым событием (событиями). Предположим, что существует вероятность конкретного события, которая может быть определена или теоретическим путем, или эмпирически по выборке данных, полученных в наблюдениях, которые велись за всеми объектами изучаемой системы. Будем считать, что, исходя из имеющихся данных, вероятности события A_i всегда определяемы. По аналогии с работой [7], определим данную статистическую вероятность *вероятностью состояния* изучаемой природно-антропогенной системы. Статистические вероятности для события A_i могут быть найдены с использованием различных алгоритмов сортировки, группировки и подсчета частот благоприятных событий в общей выборке всех наблюдений. Основное условие для эмпирического определения статистической вероятности известными методами связано с тем, что количество данных наблюдений должно быть достаточно большим, в оптимальном случае соизмеримым с числом $N = d \cdot f^r$, где f – число интервалов группирования данных для одной переменной, которое обычно принимается равным от 5 до 10, r – число характеристических переменных, определяющих совместное событие, а d – число опытных данных на одном интервале группирования ($d = 4 - 6$). Статистическая вероятность события A_i также может быть определена теоретически, исходя из теорем умножения и сложения вероятностей более простых событий [7, 25, 43]. При этом события, свойственные одной таблице

таблично-временных данных, будем рассматривать как совместные, а события, свойственные разным таблицам данных – как несовместные.

Таким образом, каждой n-мерной точке $M = M(p_1, p_2, ..., p_n)$ может быть поставлена в соответствие эмпирическая или теоретическая оценка вероятности наблюдения некоторого простого или сложного события, например, наблюдения одного показателя или совместного наблюдения двух и более показателей, из числа всех показателей, а также вероятность наблюдения других событий, особо выделенных для изучаемой системы.

Научные идеи данного подхода заключаются в принятии нескольких гипотез, которые носят феноменологический характер и могут подтверждаться или опровергаться для данного вида природно-антропогенной системы на основе имеющихся опытных данных.

Существование вероятностей сложных событий является основной статистической закономерностью и связано со свойством устойчивости относительных частот событий. Данное свойство справедливо для систем различной природы и является универсальной закономерностью при поведении очень многих систем. Так как считается, что по результатам наблюдений алгоритмически или теоретически можно определить статистическую вероятность состояния изучаемой природно-антропогенной системы применительно к каждому объекту, то в таблично-временных массивах информации можно искать вероятностные связи. Другими словами, предполагается искать взаимосвязи не между показателями объектов, а между вероятностями событий наблюдения этих величин. Подобный подход является универсальным и позволяет подойти к моделированию природно-антропогенных систем, исходя из вероятностных закономерностей природных, экологических и антропогенных процессов, которые отражают поведение этих систем.

Поэтому первая фундаментальная идея предлагаемого подхода заключается в поиске связей и закономерностей между вероятностями наблюдения различных событий, свойственных изучаемому массиву статистических данных. При данном подходе основной объект моделирования – это состояние объекта в пространстве H^n, которое отображается n-мерной точкой. Первой основой для количественной характеристики состояния являются показатели объекта, которые

выражаются через переменные $p_1, p_2, ..., p_n$. Второй основой для характеристики состояния является оценка вероятности состояния объекта, которая отражена во множестве наблюдаемых событий и их характеристических случайных величин [4, 5, 7, 48, 49, 52, 122, 123, 152]. Это позволяет гипотетически ввести в рассмотрение две величины для характеристики состояния системы в каждой элементарной области пространства H^n: статистическую вероятность наблюдения характерных событий $w(p_1, p_2, ..., p_n)$ и комплексный индекс $T = T(p_1, p_2, ..., p_n)$ – скалярную величину, характеризующую состояния изучаемой системы и отражающую результат моделирования, которая представляется в виде функциональных зависимостей относительно показателей $p_1, p_2, ..., p_n$. Комплексный индекс $T = T(p_1, p_2, ..., p_n)$ в области H^n может быть представлен в виде функциональных зависимостей относительно всех n показателей: мультипликативными, мультипликативно-степенными, экспертными или иными зависимостями.

Вторая основная идея предлагаемого подхода связана с возможностью создания для описанных выше массивов таблично-временных статистических данных феноменологических моделей, отличающихся принятием гипотезы существования скалярных полей распределений вероятности событий. С этой целью предполагается, что вероятность $w(p_1, p_2, ..., p_n)$ в пространстве H^n образует скалярное поле. Считается также, что на основе комплексного индекса $T = T(p_1, p_2, ..., p_n)$ может быть построена приближенная математическая модель, которая формирует еще одно скалярное поле, называемое средой моделирования. Далее для любого процесса l вблизи произвольной точки M постулируется связь вида $dw = c_l \cdot dT$, где c_l – величины, зависящие от процесса, который осуществляется каждым природно-антропогенным объектом, и позволяющие получить значительно более точную модель системы. Величины c_l могут быть определены по имеющимся статистическим данным регрессионным анализом в случае, если сформулированные выше гипотезы справедливы для изучаемой системы. Таким образом, видно, что предлагаемая методология очень тесно связана с логическим методом, принятым в термодинамике, сущность которого

заключается в том, что на основе опытных данных формируются феноменологические модели, позволяющие описать с необходимой точностью поведение определенного класса объектов [33]. Отличительной особенностью подхода является то, что предложенные выше гипотезы могут быть приняты или отвергнуты на основе обработки имеющихся данных, а также то, что данный подход позволяет изучать в совокупности процессы разной природы: физико-химические, экологические, социально-экономические и др.

Таким образом, основные подходы, идеи и рабочие гипотезы данного исследования формулируются в виде:

- использование обширных статистических данных о состоянии и динамике природно-антропогенных систем в самых разных аспектах, а также теоретическое или алгоритмическое определение вероятностей событий, связанных с наблюдением показателей и индикаторов, позволит установить феноменологические закономерности для данного класса систем;
- поиск связей и закономерностей в массиве данных осуществляется не между показателями и индикаторами объектов, а между вероятностями событий наблюдения этих величин;
- статистические вероятности для характерных простых и сложных событий A_i могут быть найдены эмпирически с использованием различных алгоритмов сортировки, группировки и подсчета частот благоприятных событий в общей выборке всех наблюдений или теоретически, исходя из теорем умножения и сложения вероятностей более простых событий;
- предполагается, что в пространстве состояний H^n можно сформировать некоторый комплексный индекс $T = T(p_1, p_2, ..., p_n)$, на основе которого будет создаваться математическая модель для комплексной оценки объектов и их многопараметрического ранжирования;

- для каждой элементарной окрестности пространства состояний системы H^n, которая определена произвольной точкой $M = M(p_1, p_2, ..., p_n)$, и любого процесса l в окрестности этой точки используется гипотеза о связи статистической вероятности характерных событий и комплексного индекса вида $dw = c_l \cdot dT$, где величины c_l определяются по статистическим данным, исходя из изменения величин w и T при осуществлении процесса l;
- комплексная оценка и многопараметрическое ранжирование по совокупности показателей для конкретных объектов природно-антропогенной системы возможны по отношению ко всей группе объектов. Оценка проводится в многомерном вероятностном пространстве путем определения функций состояния, которые являются поверхностями уровня и координатными линиями в пространстве H^n для поля вероятности состояния системы. Нелинейное преобразование координат $p_1, p_2, ..., p_n$ пространства H^n относительно этих функций состояния позволяет преобразовать H^n в линейное пространство, в котором функции состояния как обобщенные координаты обладают свойством аддитивности. Все это дает возможность объективно оценить статус объекта среди множества объектов одного класса;
- предполагается, что для различных природно-антропогенных систем на основе предложенных методов могут быть разработаны методики для комплексной оценки и многопараметрического ранжирования объектов, а также методики оценки рисков различных событий, которые не будут связаны с применением экспертных методов.

Исходя из сформулированных принципов, подходов и гипотез, которые положены в основу разработки теории комплексной оценки и многопараметрического ранжирования природно-антропогенных систем, методика построения феноменологических моделей в каждом конкретном случае включает следующие этапы:

- составляется база данных показателей и индикаторов для определенного вида природно-антропогенной системы. Считается, что опытные точки из этой базы данных являются ограниченной выборкой

наблюдений из некоторой генеральной совокупности множества состояний однотипных объектов, которые образуют данную систему;

- применительно к изучаемой природно-антропогенной системе как к классу однотипных объектов формулируются принципы и теоретические методы комплексной оценки, учитывающие особенности данной системы, суть которых в общих чертах была изложена выше;
- формируется перечень атрибутивных показателей, наиболее полно характеризующих состояния изучаемой системы. Атрибутивные показатели определяются сложившимися в научном сообществе представлениями о поведении изучаемой системы, корреляционным анализом данных или другими методами установления наиболее значимых переменных. Комплексная оценка и многопараметрическое ранжирование объектов основывается на использовании данных показателей;
- выбираются некоторые характерные события, которые свойственны изучаемой природно-антропогенной системе и отражают ее эволюционное развитие. Также выбираются основные совместные события одновременного наблюдения атрибутивных показателей, однозначно характеризующие состояния изучаемой системы. Вероятности этих совместных событий определяют вероятность состояния системы. Формулируются методы оценки статистических вероятностей данных событий (как различных характерных событий, так и основных совместных событий);
- исследуются особенности и закономерности изучаемой системы, предлагаются гипотезы и разрабатываются способы определения комплексного индекса $T = T(p_1, p_2, ..., p_n)$ на основе выбранных атрибутивных показателей, входящих в базу данных исследуемого вида природно-антропогенной системы;
- устанавливаются регрессионные зависимости, характеризующие связь статистической вероятности состояния системы с комплексным индексом. Ищутся также зависимости, определяющие связь вероятности состояния системы с вероятностями различных характерных событий, свойственных изучаемой природно-антропогенной системе;
- после разработки методов оценки комплексного индекса и статистической вероятности состояния системы находятся

феноменологическое константы, характеризующие процессы изменения состояний для данного вида природно-антропогенной системы, исходя из регрессионного анализа данных;

- формулируются практические методы комплексной оценки и многопараметрического ранжирования природно-антропогенных объектов. Определяются функции состояния, которые представляют собой многомерные поверхности уровня и координатные линии в линейно преобразованном пространстве H^n, свойственном изучаемой системе;
- осуществляются практические расчеты для тестовых примеров, разрабатываются модели комплексной оценки для отдельных видов природно-антропогенных систем, устанавливаются закономерности и особенности опасных событий и процессов в изучаемых системах, оценивается риск таких событий и процессов, исходя из определения вероятности соответствующих событий и связей между вероятностями различных событий;
- создаются практические методики для комплексной оценки конкретных видов природно-антропогенных систем на основе феноменологического анализа данных о состоянии природных и антропогенных сред. Предлагается комплекс практических средств методического и информационного обеспечения для оценки опасностей и рисков при техногенных воздействиях на природную среду и человека.

В процессе реализации указанных выше этапов применяются следующие методы исследования:

- подходы и методы системного анализа, теории систем и системодинамики применительно к процессам, происходящим в природно-антропогенных системах;
- теоретические и алгоритмические методы определения вероятностей сложных событий, методы оценки рисков и линейного и нелинейного регрессионного анализа данных;
- математическое моделирование и расчетные компьютерные методы применительно к исследуемым процессам;
- методы обобщения информации субъектов экологического, социально-экономического мониторинга, методы статистической обработки данных и анализа временных рядов;

- апробация предложенных методов и методик у субъектов государственного мониторинга.

При построении теории комплексной оценки с применением подходов системного анализа, теории систем и системодинамики имеется необходимость применения следующих методов:

- методов моделирования систем с использованием эмпирических мер для комплексного описания состояния природно-антропогенных систем [4, 7, 48, 49, 52, 122, 152]. В данной работе в качестве эмпирической меры применяется вероятность характерных событий, которая может быть представлена в виде многомерных распределений относительно показателей изучаемой системы $w = w(p_1, p_2, ..., p_n)$. Существование эмпирической меры в виде вероятности состояния системы является основной гипотезой для разработки теории комплексной оценки природно-антропогенных систем;
- континуального подхода и логического метода представления количественной информации об изменении и развитии природно-антропогенных систем в виде сплошной непрерывной информационной среды. При этом опытные точки из массива данных представляются ограниченной выборкой наблюдений из некоторой генеральной совокупности множества состояний однотипных объектов, которые образуют данную систему. Это позволяет представить вероятность состояния системы в виде скалярного поля и применить при анализе апробированные методы теории сплошной среды;
- метода математического анализа, позволяющего представить изменение вероятности состояния системы относительно феноменологических величин и простых функциональных зависимостей $dw = c_l \cdot dT(p_1, p_2, ..., p_n)$. Данный подход позволяет любой процесс в окрестности произвольного состояния системы представить в виде разложения по сумме простых функций относительно комплексного индекса $dw = \sum_{k=1}^{n} \frac{\partial w}{\partial p_k} dz_k = \sum_{k=1}^{n} \left(\frac{\partial w}{\partial T} \right)_k \frac{\partial T}{\partial p_k} dz_k = \sum_{k=1}^{n} c_k \cdot \frac{\partial T}{\partial p_k} dp_k$. В результате исходная задача комплексной оценки сводится к решению дифференциальных уравнений Пфаффа [7, 117];

- методов нелинейных преобразований, которые позволяют скалярное поле вероятности состояния системы, заданное в пространстве многомерных координат, представить путем нелинейных преобразований в линейном пространстве комплексных переменных.

При определении вероятностей и рисков простых и сложных событий имеется необходимость в использовании методов теории вероятностей и математической статистики:

- основных теорем сложения и умножения вероятностей и их следствий при теоретическом определении вероятностей совместных и несовместных событий;
- методов непосредственного подсчета вероятностей на основе опытных данных путем использования различных алгоритмов сортировки, группировки и подсчета частот благоприятных событий в общей выборке всех наблюдений;
- процедур изучения и анализа событий, систематизации и обобщения информации о конкретных природно-антропогенных системах, а также методов корреляционного анализа данных при установлении атрибутивных показателей, характеризующих эти системы;
- методов линейной и нелинейной множественной регрессии при установлении закономерностей и получении зависимостей между изучаемыми величинами.

Математическое моделирование и расчетные компьютерные методы требуют использования при разработке расчетных моделей и реализации разработанных зависимостей применительно к множеству объектов исследования в процессе комплексной оценки и многопараметрического ранжирования природно-антропогенных систем по совокупности различных показателей.

Методы обобщения информации субъектов экологического и социально-экономического мониторинга, статистической обработки данных и анализа временных рядов обычно применяются в процессе предварительного сбора информации и формирования баз данных для последующего анализа, а также получения предварительных выводов о возможности использования тех или иных массивов данных в исследованиях и их представления в структурированном виде.

Апробация предложенных методов и методик у субъектов мониторинга проводится при комплексной оценке путем применения расчетных методик в практической деятельности субъектов мониторинга, совместной подготовке докладов о состоянии окружающей среды территорий, городов и областей, а также путем разработки методик оценки экологических рисков и различных региональных программ в области охраны окружающей среды и социально-экономического развития.

Предложенные выше подходы отличаются новизной, ряд гипотез, методов и средств решения поставленных задач в фундаментальной области исследований предлагается впервые.

2.2. Объекты комплексной оценки и данные

В процессе работы предполагается разработка методов комплексной оценки и оценки рисков опасных событий для нескольких видов природно-антропогенных систем, а также моделирование процессов, связанных с изменениями состояний данных систем.

В экологии, урбанистике, охране окружающей природной среды, техногенной и экологической безопасности, биологии, оценке биоразнообразия и социально-экономического развития городов, регионов и стран накоплены обширные базы данных, позволяющие вести речь об установлении феноменологических закономерностей развития различных объектов и разработать методы комплексной оценки и многопараметрического ранжирования этих объектов. Существует множество источников данных, которые несут информацию о компонентах и аспектах развития природно-антропогенных систем, городов, регионов и стран мира, а также техногенных и природно-промышленных комплексов.

В связи с тем, что для выполнения комплексной оценки систем необходимы массивы данных показателей и индикаторов состояния и развития природно-антропогенных систем, был выполнен анализ существующих данных для различных видов таких систем. В результате анализа установлено, что для создания архивов структурированных статистических данных, решения тестовых задач и разработки методик

комплексной оценки и оценки рисков можно использовать данные наблюдений для следующих видов природно-антропогенных систем:

- урбоэкосистемы городского типа (населенные пункты и города) – для изучения загрязнения природных сред и экологической обстановки, анализа негативных и опасных воздействий на окружающую среду и человека, а также для исследования процессов экологического и социально-экономического состояния городов;
- страны Европы и мира – для исследования экологических процессов и оценки человеческого развития;
- биологические и природные системы – для комплексной оценки биоразнообразия и изучения состояния природно-антропогенных систем по показателям биоразнообразия;
- природно-промышленные и технологические комплексы – для построения моделей состояния объектов и оценки рисков воздействий таких объектов на окружающую среду и человека.

Для указанных видов природно-антропогенных систем на основе открытых источников различных организаций, известных и общедоступных Web-ресурсов были сформированы необходимые для анализа массивы структурированных данных в соответствии со структурой «объекты-показатели-время», описанной в предыдущем разделе.

Как указывалось ранее, для характеристики самых разных аспектов природно-антропогенных систем в мировой практике разработаны комплексы показателей и индикаторов, которые приняты к использованию научным сообществом [37 – 39, 59, 75, 83, 84, 87, 94, 97, 102, 103, 115, 127, 131]. На основе этих показателей оценивается состояние систем и рассчитывают различные индексы, характеризующие развитие природно-антропогенных систем.

При комплексной оценке урбоэкосистем использовались данные мониторинга загрязнения окружающей среды в городах, анализировались экологические показатели городов и оценивались риски негативных воздействий на человека.

Например, при изучении загрязнения воздуха в городах собирались и структурировались данные Гидрометеоцентров России и Украины, а также базы данных показателей развития городов [47, 61, 131].

База данных Украинского гидрометеоцентра включает статистические таблицы данных по 53 городам Украины на 163 стационарных, двух маршрутных постах наблюдений и двух станциях трансграничного переноса в период с 2000 по 2014 гг. по всем контролируемым вредным веществам. Обычно в базе данных представлена информация о концентрациях следующих основных загрязнителей: пыль, диоксид азота, диоксид серы, оксид углерода и формальдегид с интервалом 6 – 12 часов в сутки кроме воскресенья и праздничных дней, а для тяжелых металлов и бенз(а)пирена с интервалом 1 месяц. Также соответствующая информация имеется о концентрациях фенола, аммиака, фтористого водорода, сероводорода, хлористого водорода, растворенных сульфатов, серной кислоты, сажи, бензола, толуола, этилбензола, ксилола и анилина. В настоящее время в базу данных загрязнения атмосферы городов Украины заносится информация о содержании 31 вредной примеси в воздухе. Характеристика статистических данных дана в таблице 2.1.

Таблица 2.1. – Характеристика данных Украинского гидрометеоцентра о загрязнении атмосферного воздуха в городах за 2012 год

Контролируемые вредные вещества	Кол-во городов	$ПДК_{с.с.}$, мг/м^3	Концентрации вредных веществ, мг/м^3		
			Минимум	Максимум	Среднее
Пыль	53	0,15	0,030	0,700	0,175
Диоксид азота	53	0,04	0,010	0,130	0,054
Диоксид серы	53	0,05	0,001	0,054	0,017
Оксид углерода	48	3,0	0,90	5,00	2,11
Формальдегид	43	0,003	0,002	0,021	0,008
Бенз(а)пирен		10^{-6}	$0{,}03 \cdot 10^{-3}$	$2{,}80 \cdot 10^{-3}$	$0{,}99 \cdot 10^{-3}$
Фенол	23	0,003	0,001	0,007	0,0028
Аммиак	23	0,04	0,0	0,013	0,0036
Фтористый водород	14	0,005	0,0	0,190	0,019
Сероводород	16	–	0,000	0,005	0,0023
Хлористый водород	11	0,2	0,020	0,180	0,075
Сажа	6	0,05	0,010	0,080	0,040
Растворенные сульфаты	19		0,00	0,030	0,012
Серная кислота	2	0,1	0,010	0,020	0,015

В России в настоящее время сеть мониторинга качества воздуха включает 260 городов, в которых работает 710 станций, регулярные наблюдения Росгидромета проводятся в 226 городах на 649 станциях. В процессе мониторинга контролируются концентрации около 40 вредных веществ. В Белоруссии сеть мониторинга атмосферного воздуха охватывает 18 крупнейших городов и включает более 60 стационарных постов. На данных постах контролируются концентрации более 40 загрязняющих веществ.

При изучении развития городов использовались данные по городам Европы [131] и «зеленым» городам мира. Например, для городов Европы экологические и социально-экономические показатели включают: количество населения, ВВП на душу населения по паритету покупательной способности, валовые выбросы диоксида углерода на душу населения, потребление энергии на душу населения, долю возобновляемых источников энергии, потребляемой в городе, долю граждан, передвигающихся общественным транспортом, велосипедами или пешком, среднегодовое потребление воды на душу населения, долю перерабатываемых отходов и т.д.

При изучении развития стран мира использовались: база данных Программы развития ООН, база данных индикаторов развития стран мира Всемирного банка, база данных международного Интернет-ресурса Trading Economics, экологическая база данных стран Европы, справочник ЦРУ по странам мира и т.д. Сегодня эти базы данных присутствуют в открытом доступе сети Internet соответственно по адресам:

- база данных Программы развития ООН [18]: *http://hdr.undp.org/en/data*;
- база данных индикаторов развития стран мира Всемирного банка [17]: *http://data.worldbank.org/*;
- международный Интернет-ресурс о развитии стран мира [76]: *http://www.tradingeconomics.com/;*
- база данных экологических показателей стран Европы [47].
- база данных Центрального Разведывательного Управления (ЦРУ) по странам мира [127]: https://www.cia.gov/library/publications/.

База данных Программы развития ООН включает статистические таблицы данных почти по 100 странам в период 1975 – 1980 годов и по 187

странам в период 2011 – 2013 годов. Эта база данных содержит около 100 индикаторов, по которым определяются несколько индексов, характеризующих различные аспекты человеческого развития.

В свою очередь, база данных Всемирного банка включает в себя 21 компонент и аспект развития стран мира, в которые сведены более 1200 показателей ретроспективой за 50 лет.

Для регионов и городов России, Украины и Белоруссии существуют статистические сборники, позволяющие сформировать структурированные данные социально-экономического, экологического и природно-антропогенного характера. Например, некоторые статистические данные для комплексной оценки, характеризующие города Донбасса, приведены в таблице 2.2.

База данных ресурса Trading economics содержит статистические таблицы данных 300 000 показателей и индикаторов по 196 странам. База данных доступна для исследователей и экспертов с 2008 года. Однако по многим аспектам этой базы данных сложно образовать обширные массивы структурированных данных в виде «объекты-показатели-время».

База данных стран Европы [47] содержит социально-экономические, экологические, демографические и другие данные для 55 стран Европы по 70 показателям состояния и развития.

База данных ЦРУ [127] охватывает информацию для 257 стран мира по более, чем 200 индикативным показателям и представлена в виде ежегодного справочно-энциклопедического издания, включающего информацию разведывательного управления США по всем направлениям мирового развития (земельные, водные и людские ресурсы, правительство, экономика, коммуникации, обороноспособность страны и т.д.). Первая несекретная версия справочника опубликована в 1971 году, с 1975 издание стало доступно для общественности с продажами через Управление правительственной печати США, а в Интернет-сети появилось с 1997 года. Сегодня объем ежегодного справочника превышает 1000 страниц.

В открытом доступе имеются также и другие базы данных социально-экономического развития стран мира. Список некоторых известных баз данных, которые в том или ином виде использовались или изучались в данной работе, приведен в таблице 2.3.

Таблица 2.2. – Статистические показатели, характеризующие развитие городов Донецкой области в 2006 году

Статистические показатели по состоянию на 2006 год	Ма-кеевка	Донецк	Гор-ловка	Ена-киево	Крама-торск	Мари-уполь
Финансовые показатели						
Финансовый результат от обычной деятельности до налогообложения, млн. грн.	-217,7	6371,2	-390,9	349,1	363,3	3622,6
Экспорт, в % к общему объему в тыс. дол. США	2,72	20,58	5,01	7,45	3,12	44,84
Импорт, в % к общему объему в тыс. дол. США	10,48	41,62	4,77	1,65	3,20	24,14
Розничный товарооборот предприятий, млн. грн.	711,0	5802,1	449,2	159,3	363,4	1505,8
Среднемесячная заработная плата, грн.	1034	1275	1019	1006	1280	1539
Уровень безработицы, %	1,1	0,7	1,9	1,1	2,2	0,4
Демографические показатели						
Население, тыс. чел.	409,8	1004,6	293,4	144,2	205,8	499,6
Плотность населения, чел./км^2	963	1760	695	339	963	2048
Природный прирост (на 1тыс. населения)	-9,8	-6,8	-10,7	-12,2	-8,4	-7,4
Рождаемость, случаев (на 1 тыс. населения)	8,3	8,0	8,3	7,9	9,3	8,1
Смертность, случаев (на 1 тыс. населения)	18,1	14,8	19,1	20,1	17,7	15,5
Показатели образования						
Кол-во детей в дошкольных заведениях (на 1 тыс. чел.)	19,5	22,0	21,1	20,8	22,4	26,8
Кол-во учеников в дневных общеобразовательных учебных заведениях (на 1 тыс. населения)	76,9	79,0	79,4	84,6	87	81,1
Показатели здоровья населения						
Младенческая смертность (на 1 тыс. рожденных живыми)	11,0	16,7	14,3	7,6	9,0	8,9
Заболеваемость (на 10 тыс. населения)	5172	7067	6603	7346	6903	7388
Заболевшие туберкулезом (на 100 тыс.)	419,9	249,4	318,4	479,7	271,9	226,3
Показатели безопасности						
Количество потерпевших от производственного травматизма (на 1 тыс. работающих)	8,4	4,0	6,4	7,2	2,9	2,4
Количество погибших от производственного травматизма (на 100 тыс. работающих)	13,2	17,5	15,7	27,1	3,6	8,5
Количество преступлений (на 1 тыс. чел.)	11,4	11,6	10,9	9,37	9,8	13,2
Выбросы вредных веществ						
Выбросы загрязняющих веществ от стационарных источников, тыс. тонн	123,5	140,0	44,2	62,9	13,4	397,3
Выбросы загрязняющих веществ от передвижных источников, тыс. тонн	17,2	71,2	9,4	6,2	10,3	32,7
Уровень загрязнения атмосферного воздуха в долях ПДК$_{с.с.}$						
Диоксид азота	2,0	2,5	2,2	1,8	1,4	1,5
Пыль	2,7	1,7	2,7	2,7	0,5	1,5
Диоксид серы	0,3	0,15	0,7	0,4	0,15	0,15
оксид углерода	0,7	0,4	1,2	1,1	0,25	0,3
Показатели водопользования						
Забор воды из природных источников, млн. м^3	60,3	69,2	32,4	52,8	46,0	1004,7
Использование свежей воды, млн. м^3	50,3	126,8	28,8	22,9	58,8	1029,3
Сброс загрязненных сточных вод в поверхностные водные объекты, млн. м^3	48,0	57,1	43,7	19,2	12,4	898,3
Образование отходов						
Накоплено опасных отходов, тыс. тонн	5406,4	191,8	83,5	91,4	11,9	149,2
Образовано опасных отходов, тыс. тонн	377,20	93,935	3,039	1,117	0,798	152,60
Использовано отходов I-III классов опасности, тыс. тонн	1,590	3,543	1,387	0,643	0,196	68,495

Таблица 2.3. – Некоторые статистические базы данных о развитии стран и регионов мира

Название	Краткая характеристика	Адрес доступа
Статистика ООН	Статистика глобального и национального уровня, собранная ООН по различным аспектам развития стран	http://data.un.org
Статистика Международного валютного фонда	Статистические данные по всевозможным финансовым и экономическим показателям	http://www.imf.org/external/data.htm
Статистика ВТО	База данных статистики для стран мира по торговой политике, доступам на рынки, экспорту и импорту	https://www.wto.org/english/rese/statis_e/statis_e.htm
Статистика Всемирного банка	Более 2000 показателей развития стран мира ретроспективой до 50 лет	http://data.worldbank.org/
Справочник ЦРУ по странам мира	Подробная статистика и фактическая информация по всем странам мира	https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/
Статистика Index mundi	Экономическая, демографическая, телекоммуникационная, военная и транспортная статистика по странам мира	http://www.indexmundi.com/g/r.aspx?v=31
Статистика Международного энергетического агентства (МЭА)	База данных для стран мира по производству и потреблению основных источников энергии	http://www.iea.org/statistics
Статистика ООН по вопросам образования, науки и культуры (ЮНЕСКО)	Более 1000 индикаторов и данных по вопросам образования, грамотности, науки и технологий для более 200 стран	http://www.uis.unesco.org/Pages/default.aspx
Статистика ООН по промышленному развитию (ЮНИДО)	Данные по показателям промышленного производства стран мира	http://www.unido.org/index.php?id=1002110
Статистика Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (ФАО)	Данные по обеспечению продовольствием и водой, пахотными землями, лесными ресурсами, развитию животноводства и производству продуктов питания.	http://www.fao.org/statistics/en/
Статистика статистической службы ЕС	Базы статистических данных по странам Евросоюза	http://ec.europa.eu/eurostat/help/new-eurostat-website
Статистика Детского фонда ООН (ЮНИСЕФ)	Статистические данные по проблеме защиты прав детей в различных странах мира	http://www.unicef.org/statistics/index_24287.html

Обзор существующих баз данных приведен также на ресурсе [98], где представлены ссылки на 60 различных статистических баз данных, которые несут информацию о компонентах и аспектах развития городов, регионов и стран мира. В данных базах содержится информация о социально-экономическом, экологическом, торговом, промышленном, энергетическом, научно-технологическом, военном, ресурсном и культурном потенциале стран мира и их регионов.

В открытом доступе имеется также информация о более чем 30 основных индексах развития и более 20 рейтингах развития стран и регионов [98]. Некоторые основные индексы и рейтинги приведены в таблице 2.4.

Проведенный анализ показывает, что во многих случаях существуют необходимые для анализа данные, которые могут быть использованы при оценке экологических процессов и процессов человеческого развития для городов, регионов и стран мира.

При изучении процессов биоразнообразия природно-антропогенных систем использовались следующие базы данных:

- глобальная база данных по биоразнообразию – GBIF. – Электр. ресурс. URL: http://data.gbif.org/welcome.htm/ (25.05.16);
- база данных AnAge: The Animal Ageing and Longevity Database. – Электр. ресурс. URL: http://genomics.senescence.info/species/ (05.06.16);
- базы данных проекта «Биоразнообразие России». – Электр. ресурс. URL: http://www.zin.ru/BioDiv/bd_dbas.htm/ (08.06.16);
- база данных «Биоразнообразие Белоруссии». – Электр. ресурс. URL: http://florafauna.by/page/about/ (05.06.16);
- данные Всемирного фонда дикой природы. – Электр. ресурс. URL: http://www.wwf.ru/resources (05.06.16);
- различные энциклопедии, например, Энциклопедия «Животные» [118].

Данные базы данных являются достаточно обширными, например, база данных AnAge [120] включает в себя информацию о 4083 видах позвоночных животных по более 25 показателям и характеристикам биологических организмов.

Таблица 2.4. – Некоторые международные индексы и рейтинги для оценки развития стран

Название	Краткая характеристика	Адрес доступа
Индекс развития человеческого потенциала (UNDP)	Составной индекс, ежегодно определяемый Программой развития ООН	http://hdr.undp.org/en/data
Индекс восприятия коррупции (Transparency International)	Индекс оценки уровня коррупции на глобальном и региональном уровнях	http://www.transparency.org/cpi2012/
Индексы и рейтинги демократии (Freedom House)	Рейтинги, составленные Freedom House	https://freedomhouse.org/reports
Индекс демократии (Economist Intelligence Unit)	Индекс оценки демократии по 60 показателям, сгруппированных в 5 категорий	http://www.eiu.com/public/topical_report.aspx?campaignid=DemocracyIndex2011
Индекс свободы прессы Агентства «Репортеры без границ»	Рейтинг стран основан на индивидуальном опросе журналистов	http://en.rsf.org/press-freedom-index-2011-2012,1043.html
Индекс уровня глобализации городов (Global Cities Index)	Индекс составляется политологическим журналом Foreign Policy совместно с компанией A. T. Kearney и институтом The Chicago Council on Global Affairs	http://www.atkearney.com/research-studies/global-cities-index
Индекс Глобализации (Globalization Index)	Индекс составлен консалтинговой компанией A.T. Kearney	http://www.atkearney.com/research-studies
Индекс Глобализации Швейцарского технологического института Цюриха	Индекс оценивает параметры глобализации 158 стран мира по трем категориям: экономическая, социальная и политическая глобализация	http://globalization.kof.ethz.ch/
Индекс ведения бизнеса Всемирного Банка (Doing Business)	Глобальное исследование Всемирного банка по показателю свободы ведения бизнеса	http://www.doingbusiness.org/
Индекс глобальной конкурентоспособности	Индекс отражает условия ведения бизнеса и общую конкурентоспособность экономик 140 стран мира	http://www.weforum.org/reports/global-competitiveness- report-2014-2015
Индекс международной безопасности International Security Index (iSi)	Индекс для оценки глобальной безопасности	http://pircenter.org/en/static/international-security-index-isi
Рейтинг репутации стран мира (The Country Rep Trak)	Рейтинг международной консалтинговой компании Reputation Institute, оценивающий репутацию различных стран мира	http://www.reputationinstitute.com/thought-leadership/country-reptrak
Рейтинг стран мира по уровню развития электронного правительства	Рейтинг оценивает возможности государственных структур в 190 стра нах в использовании ИТ-технологий для предоставления гражданам услуг	http://www.un.org/en/development/desa/publications/connecting-governmen ts-to-citizens.html
Рейтинг военных армий государств мира	Рейтинг 106 стран по 50 показателям вооруженных сил	http://www.globalfirepower.com

Описанные выше природно-антропогенные системы разных видов приняты в качестве объектов исследования. Данные характеризующие указанные системы представлялись в структурированном виде. На основе этих данных проводилось установление закономерностей и зависимостей, оценка событий и их вероятностей, решение тестовых задач, апробировались предложенные методы комплексной оценки и многопараметрического ранжирования природно-антропогенных систем.

Основные области приложений представленных методов комплексной оценки были связаны с изучением уровня загрязнения атмосферного воздуха городов и построением комплексных индексов для оценки состояния загрязнения и экологической обстановки в городах; исследованием экологических процессов и процессов человеческого развития в городах и странах мира и построением систем комплексной оценки устойчивого развития городов, стран и регионов; изучением состояния природно-антропогенных систем по показателям биоразнообразия; разработкой моделей социальных систем по совокупности показателей и т.п.

Глава третья

ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МЕТОДЫ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ПРИРОДНО-АНТРОПОГЕННЫХ СИСТЕМ

3.1 Некоторые используемые понятия и определения

Комплексная оценка и оценка риска основывается на системном подходе, охватывающем разные сферы жизнедеятельности человека и имеющем применение на стыке многих областей знаний, как естественных, так и социогуманитарных. В методологическом плане данная область исследования является частью целого теоретического направления, которое называется теорией систем, в свою очередь, в научно-практическом плане данное направление связано с теорией и практикой безопасности систем. Освещаемые в монографии задачи ориентированы на комплексный анализ состояния и тенденций развития различных природно-антропогенных систем, а также на изучение экологических и техногенных рисков негативных и опасных событий.

Несмотря на развитие многих областей научных исследований, ряд методологических вопросов опасности и риска проработан крайне слабо. Ещё в работе Маршала [72] отмечалось, что одно из наиболее существенных затруднений в обсуждении проблемы опасности и риска связано с отсутствием общей теории, построенной на использовании аналитических методов. Это объясняется тем, что опасности могут существовать во многих формах и реализовываться (проявлять свой опасный или вредный потенциал) разными способами, а вероятности опасных событий (в связи с ограниченным объемом опытных данных и случайностью многих таких событий) изучены явно недостаточно. Кроме этого, следует отметить, что в данной области отсутствуют общесистемные представления и гипотезы, позволяющие сформулировать основные положения формализованной теории в виде комплекса методов. Именно поэтому ученым пока не удалось предложить общую теорию опасности и риска.

За последние десятилетия основная масса работ исследователей была посвящена изучению опасности различных химических веществ и

вызываемых ими негативных последствий – токсикологических, радиационных и тепловых воздействий, острых и смертельных поражений, связанных со взрывами, пожарами, ударными волнами и т.д. Много внимания уделялось также опасности различных природных катаклизмов – землетрясениям, цунами, наводнениям, ураганам и т.д. В этой области накоплен определенный экспериментальный материал, который в настоящее время систематизирован в токсикологии, радиологии, промышленной и экологической безопасности, охране труда, безопасности жизнедеятельности человека, в целом ряде наук о Земле и т.д.

Формирование процессов в природно-антропогенных системах связано с изменением во времени состояний систем. В зависимости от внешних и внутренних условий, в таких системах могут реализовываться различные процессы и наблюдаться разные события. Иногда возникают состояния, которые по определенным факторам, событиям, параметрам или характеристикам могут считаться неблагоприятными, опасными или требующими особого контроля. Поэтому понятия опасности и риска должны быть связаны с представлениями об особых состояниях природно-антропогенных систем, которые по факторам безопасности требуют соответствующих методов их распознавания.

В этом плане основные экспериментальные проблемы в области оценки опасностей и рисков направлены на установление границ (уровней, порогов), когда процесс изменения состояния системы может быть отнесен (по заданным факторам) к безопасному или опасному процессу. В свою очередь, теоретические проблемы связаны с изучением вероятностных закономерностей формирования неблагоприятных и опасных событий при различных воздействиях, изложением подходов, представлений и гипотез для развития теорий, разработкой теоретических и аналитических методов анализа опасностей, построением вероятностных моделей риска и т.д.

Исходя из этого, создание теории опасности и риска возможно только на основе обобщения экспериментально установленных закономерностей формирования неблагоприятных и опасных процессов в природно-антропогенных системах и вероятностных оценок соответствующих опасных событий. В данной области имеется много нерешенных проблем, которые существуют как в системе понятий и

определений, так и в анализе опытных данных, построении теорий и использовании математического аппарата. Имеющаяся терминология обладает целым рядом недостатков. Так, в настоящее время есть более 25 определений риска и порядка 10 наиболее употребляемых определений опасности, отображающих разные подходы к проблеме анализа опасности и риска [2, 3, 21, 51, 62, 72, 77, 87, 103]. Ряд авторов отмечает, что в данной сфере научной деятельности практически отсутствует общепринятая система терминов и определений. Большинство определений вообще не предполагает возможности формализации понятий и представлений, которые могли бы стать основанием для построения теоретических моделей, так как отражает принятую систему взглядов в различных направлениях жизнедеятельности человека без каких-либо системных обобщений и формализаций. В связи с тем, что не существует точности в определениях и представлениях, возникает много проблем при обобщении данных и выявлении особенностей и закономерностей опасных процессов.

Вторая сложность данной области научных исследований определяется тем, что имеется слишком большое количество видов опасностей, присущих природным процессам и явлениям, а также связанных с антропогенной деятельностью человека. Действие многих опасностей экспериментально исследовано недостаточно полно, что не позволяет использовать методы системного анализа и естественнонаучные методы из-за недостаточной опытной базы. Кроме того, изучение большинства опасностей относится к предмету исследования различных научных дисциплин, являющихся, в свою очередь, составляющими целого ряда естественных наук. При оценке многих видов опасностей требуется анализ экономических, социальных, экологических, технологических, демографических и биологических факторов, что приводит к необходимости использования разных методов исследования с принципиально отличной методологией. Подобная ситуация усложняет создание теории опасности и риска.

Построение любой теории основано на использовании общепринятых среди специалистов понятий и определений, систематизации опытных данных, установлении феноменологических и эмпирических закономерностей, а также разработке методологии,

позволяющий провести формализацию проблемы и применить определенный математический аппарат. Следует отметить, что сегодня в оценке опасности и риска выработан ряд представлений и положений, обобщение которых помогает продвинуться в решении теоретических проблем и, тем самым, внести вклад в изучение систем, которые могут находиться в неблагоприятных и опасных состояниях.

Решение данной проблемы связано с изложением основных положений и представлений об опасности и риске в терминах теории вероятности, исходя из причинно-следственной взаимосвязи событий. При этом основной упор следует делать не на теоретическое определение вероятностей сложных событий, представляющих собой причинно-следственные деревья (цепочки) множества более простых событий, а на феноменологический анализ вероятностей исходных сложных событий. Однако этот путь требует наличия достаточной экспериментальной базы, позволяющей определять вероятности сложных опасных событий.

В настоящее время в безопасности систем понятия опасности, риска и ущерба тесно связаны между собой. Основные определения в данной области имеют следующий смысл.

Опасность, являясь основной категорией при изучении проблем безопасности, обычно рассматривается как объективно существующая возможность негативного воздействия на общество, личность, природную среду, в результате которого им может быть причинен какой-либо ущерб или вред. В таблице 3.1 приведены наиболее распространенные определения опасности [2, 62, 72, 77]. Из приведенных определений видно, что опасность можно увязывать с некоторыми особыми состояниями (спектром или областью состояний) природной, техногенной или природно-антропогенной системы. Это позволяет с единых позиций подойти к оценке безопасных и опасных процессов, исходя из анализа различных характерных событий. Однако, приведенные определения не позволяют формализовать понятие состояния системы с целью выделения опасных состояний.

Таблица 3.1. – Существующие определения термина «Опасность»

Термин «Опасность»	Авторы, источник
Опасность – это геологические условия, процесс или потенциально возможное событие, угрожающее здоровью, безопасности и благосостоянию населения или нормальному функционированию экономики и органов управления.	Геологическая служба США
Опасность – это природное или техногенное явление, когда возможно появление событий или процессов, способных поражать людей, причинять материальные ущербы, разрушать окружающую среду.	В. Маршал, [72]
Опасность – это явление или ситуация, которая может нанести вред здоровью человека или его безопасности.	Дж. Фиксел
Опасность – это вероятность возникновения в определенный момент времени и в пределах данной территории явления, которое потенциально может поражать людей и нанести материальный ущерб.	Д. Варнес
Опасность – природное или техногенное явление с прогнозируемыми, но неконтролируемыми событиями, способными в определенный момент времени в пределах данной территории нанести вред здоровью людей, вызвать материальные ущербы, разрушить окружающую природную среду.	А.Б. Качинский, [62]
Опасность – угроза, возможность причинения ущерба человеку, имуществу и (или) окружающей среде.	Методика определения рисков, 2003, [77]
Опасность – совокупность постоянно действующих и случайно возникающих факторов в результате некоторого инициирующего события, либо при некотором стечении обстоятельств, оказывающая негативное воздействие на реципиентов[1].	ДСТУ 2156-93, [45]

[1]реципиент – объект живой или неживой природы (человек, животные, растения, биосфера, материальные ресурсы, здания, сооружения и т.п.).

Количественная оценка уровня опасности основана на оценке риска.

Риск – вероятность возникновения опасных событий, неблагоприятных эффектов или негативных последствий у живого или материального объекта через действие вредных или опасных факторов окружающей среды.

В таблице 3.2 приведены наиболее распространенные определения риска.

Таблица 3.2. – Существующие определения термина «Риск»

Термин «Риск»	Авторы
Риск – это осознанная опасность в какой-либо системе нежелательного события с определенными во времени и пространстве последствиями.	А. Рагозин
Риск – это частота реализации опасности.	В. Маршал [72]
Риск – это вероятность неблагоприятных последствий.	Дж. Фиксел
Риск – это величина, которая определяется как произведение величины вероятности события на меру возможности её наступления.	Е. Мушик, П. Мюлер
Риск – это вероятность потерь, которая устанавливается умножением вероятности (частоты) негативного события на величину возможного ущерба от него.	У. Роуй
Риск – это вероятностная мера возможности реализации опасности в виде определенного ущерба в искусственно созданной действиями субъекта ситуации.	Е.С. Дзекцер
Риск – это количественная мера опасности, определяемая как произведение вероятности негативного события на вероятность возможного ущерба от него.	А.Б. Качинский [62]
Риск – это степень вероятности определенного отрицательного события, которое может состояться в определенное время или при определенных обстоятельствах.	Методика определения рисков, 2003 [77]
Риск – это вероятность реализации потенциальной опасности, которая инициируется опасным объектом, и (или) негативных последствий этой реализации.	ДСТУ 2156-93 [45]
Риск – это вероятностная функция сочетания частоты возникновения того или иного неблагоприятного события и масштабов его последствий (степени).	Британский институт стандартов

Из определений видно, что риск является вероятностной категорией и связан с неблагоприятными и опасными событиями при реализации определенных состояний систем.

Таким образом, риск в простейшем своем определении – это вероятность реализации опасности, то есть вероятность возникновения некоторого сложного опасного события (или состояния) в рассматриваемой системе.

Обычно реализация опасного события (или состояния системы), в общем случае, может привести или не привести к ущербу или данное событие может нанести или не нанести вред объекту. Для оценки вероятности этого, еще более сложного события, определяется риск появления событий, представляющий собой произведение вероятности реализации опасности на условную вероятность возможного ущерба, неблагоприятного эффекта или негативных последствий при условии, что опасное событие произошло.

Ущерб – вред природной среде или человеку, потери (убытки) в сфере жизнедеятельности человека, которые возникли вследствие действия вредного или опасного фактора и оцененные в определенном размерном эквиваленте. Например, в денежном выражении, потере количества лет жизни, ухудшении жизненно важных показателей и т.д.

Как видно из приведенных выше определений, можно сказать, что риск представляет собой вероятность реализации в определенных условиях опасных состояний системы, образованной по принципу выделения окружающей среды, формирующей опасность, и объекта воздействия, у которого наблюдаются неблагоприятные эффекты и негативные последствия от действия этой опасности. При этом и реализацию опасности, и наблюдаемые эффекты и последствия можно рассматривать как сложные события, имеющие причинно-следственные связи.

На основе рассмотрения окружающей среды и объекта воздействия как целостной системы можно сформировать основные положения и определения, которые позволят прийти к теоретическому описанию как опасных, так и безопасных состояний систем путем применения феноменологических методов. Также следует отметить, что это возможно только на основе применения вероятностного подхода.

Природно-антропогенные системы, а также подавляющее большинство биологических, экологических, экономических и социальных систем относятся к категории сложных. Каждая из таких систем характеризуется своим определенным набором свойств и закономерностей, перечнем характерных параметров, а также особенностями перехода из одного состояния в другое.

В процессе смены состояний любой сложной системы происходит последовательное изменение её параметров во времени. При этом, практически все системы могут находиться либо в опасном, либо в безопасном состоянии. Опасность состояния системы может определяться по совокупности значений ее параметров, которые превышают или не достигают заданных пороговых значений, а также возможно попадают в определенные нежелательные диапазоны. Если исходить из предложенного во второй главе определения состояния системы, то в пространстве состояний H^n можно выделить области опасных или неблагоприятных состояний. Для этого следует указать диапазоны опасных (безопасных) изменений показателей p_k или для функции вероятности наблюдения характерных событий j вида $w_j(p_1, p_2, ..., p_n)$ задать пороги безопасных значений вероятности (например, меньше 5% или 1% наблюдаемого негативного эффекта). Так как параметры и вероятность связаны между собой функцией распределения, то достаточно нормировать только или параметры системы, или вероятность наблюдаемых событий. В каждом конкретном случае данный вопрос должен решаться исходя из особенностей изучаемой системы и имеющихся опытных данных.

Таким образом, *безопасное* состояние системы – это множество состояний, при которых значения всех параметров соответствуют определенно заданным требованиям. В свою очередь, *опасное* состояние системы – множество состояний, при которых значение хотя бы одного из параметров не соответствует предъявляемым к ним требованиям, заданным по показателям безопасности. Это также справедливо, если регламентирована вероятность характерных наблюдаемых событий, в этом случае задаются области безопасных и опасных изменений параметров системы, исходя из принятого значения порога вероятности.

Опасное состояние системы формируется под действием окружающей среды и внутренних условий, однако в безопасности систем окружающая среда часто не является по отношению к системе явно выраженной внешней средой. Опасная система обычно состоит из объекта и вмещающей этот объект окружающей среды, причем объект чаще всего относится к элементам живой природы и может быть распределен в пространстве окружающей среды.

Обобщая приведенные понятия и представления, будем в дальнейшем использовать следующие определения в процессе анализа опасности и риска.

Опасный фактор – физические, химические, биологические компоненты и явления живой и неживой природы, ресурсы или условия окружающей среды, способные вызвать неблагоприятные эффекты и негативные последствия у объектов воздействия при реализации опасности.

Воздействие – действие опасного фактора окружающей среды на уровне, создающем неблагоприятные эффекты и негативные последствия у реципиентов.

Объекты воздействия – реципиенты, на которые воздействует опасный фактор окружающей среды.

Окружающая среда – совокупность природных, антропогенных, экономических, социальных, техногенных и других условий, в которых находится объект воздействия.

Таким образом, опасность окружающей среды реализуется через опасный фактор, который может характеризоваться несколькими параметрами и которые, в свою очередь, имеют значения, не соответствующие требованиям, заданным по показателям безопасности.

Весь анализ опасностей, связанных с природными явлениями и деятельностью человека, основан на опыте и практике изучения опасных и неблагоприятных событий. Для того, чтобы иметь возможность применить феноменологические методы анализа вероятностей событий при оценке опасности, сформируем понятие опасной системы в следующем виде.

Опасная система – концептуальная совокупность окружающей среды, формирующей опасность, и объекта воздействия, находящегося под

действием опасного фактора среды, который с течением времени обеспечивает появление у объекта воздействия негативных эффектов и последствий или приводит к наблюдению других опасных или нежелательных событий.

Таким образом, опасность, в целом являясь важной категорией теории опасности и риска, представляется множеством опасных состояний системы, определенным образом выделенных по значениям параметров фактора опасности из общего множества всех состояний. В свою очередь, каждое опасное состояние системы однозначно характеризуется вероятностью некоторых опасных или неблагоприятных событий, позволяющих распознавать опасные состояния, а также параметрами этих опасных состояний.

Из данных выводов следует, что изучение связей между опасностью и риском возможно при наличии общего описания поведения сложной системы. Причем это описание может быть представлено множеством функций распределения вероятностей характерных событий вида $w_j = w_j(p_1, p_2, ..., p_n)$, как это было представлено в предыдущем разделе.

Таким образом, при системном подходе риск определяется вероятностями нескольких связанных между собой причинно-следственных событий:

- совместными событиями (причинами) наблюдения параметров системы, характеризующими ее состояние;
- сложными событиями (следствиями) наблюдения негативных эффектов и последствий.

При количественной оценке риска функция состояния системы $w_j = w_j(p_1, p_2, ..., p_n)$ будет определяться как параметрами состояния p_i, так и нежелательными и опасными событиями j, и будет описывать как безопасные, так и опасные состояния системы.

Подводя общий итог можно сказать, что процедура определения риска является обычной комплексной оценкой состояний систем по совокупности показателей относительно вероятности опасных и неблагоприятных событий, особо выделяемых при анализе процессов.

После этого пояснения можно дать следующее определение риска с учетом предмета исследования состояний систем при комплексной оценке.

Риск – вероятность опасных или нежелательных событий, комплексно отражающих в причинно-следственных связях существование особых состояний природно-антропогенной системы, при которых у объектов воздействия под действием опасных факторов возникают негативные эффекты и последствия или объектам наносится определенный ущерб.

В качестве характерных событий при оценке риска можно рассматривать самые разные сложные события (как опасные, так и не опасные), которые характеризуют изменения в состояниях системы, особенности поведения этой системы или некоторые ситуации, связанные с наблюдением опасных и негативных эффектов или нанесением ущерба. Поэтому можно утверждать, что в таком представлении риск является комплексным понятием и служит мерой значимости реализации опасности для того или иного воздействия или нанесенного ущерба. В опасных состояниях, которые характеризуются совместными событиями наблюдения опасных значений атрибутивных показателей, будут инициироваться сложные события возникновения неблагоприятных эффектов и негативных последствий. Соответствующие вероятности событий при наличии значимых причинно-следственных связей будут также связаны между собой.

Все это при оценке риска дает возможность систематизировать различные опасные и неблагоприятные события по отношению к объектам, времени и месту их возникновения, по отношению к состоянию системы или последствиям, связанным с этим состоянием, и т.д., используя классификацию событий, которая сегодня общепринята в теории вероятности.

3.2 Дифференциальные уравнения для вероятностного описания состояний природно-антропогенных систем

Рассмотрим в общем виде задачу комплексной оценки систем, характеризующихся совокупностью самых разных показателей. Считаем, что имеется массив статистических данных для некоторой природно-антропогенной системы, в который входят данные для m объектов и n

показателей и которые достаточно полно характеризуют эти объекты. Имеется также множество таблиц t, упорядоченных по времени, которые отражают процессы изменения состояний этих объектов во времени.

На основе переменных $p_1, p_2, ..., p_n$ сформировано многомерное пространство координат H^n, в котором возможные состояния объектов теоретически образуют некоторую область, охватывающую все наблюдения. В этом случае состояние каждого объекта в данном пространстве может быть представлено многомерной точкой $M(p_1, p_2, ..., p_n)$, а процессы изменения состояния объектов за определенный период – многомерными линиями. При этом каждая линия процесса будет отображаться t точками. Предположим непрерывность многомерной области H^n. Как указывалось в предыдущем разделе, это означает, что в пространстве состояний H^n существует бесконечное множество состояний для некоторой генеральной совокупности однотипных объектов и точки состояний $M(p_1, p_2, ..., p_n)$ этих объектов непрерывно заполняют это пространство. Будем также считать, что опытные точки из базы данных являются ограниченной выборкой наблюдений из данной генеральной совокупности.

Рассмотрим сложное совместное событие одновременного наблюдения нескольких показателей или выберем некоторое характерное событие, которое имеет характеристическую величину в виде отдельного показателя. Определим, что состояние каждого объекта может характеризоваться данным наблюдаемым событием. Обозначим данное событие как «событие j», и будем считать, что оно позволяет оценить некоторые опасные или неопасные состояния системы, выделенные при анализе по определенным соображениям по показателям безопасности. Найдем статистическую вероятность этого события на основе опытных данных, имеющихся в базе данных, с использованием алгоритмов сортировки, группировки и подсчета частот благоприятных событий или путем теоретических оценок. Считаем данную статистическую вероятность вероятностью состояния изучаемой системы. Эта статистическая вероятность w подсчитывается по всей группе объектов.

В процессе группировки данных статистическая вероятность состояния, как правило, определяется алгоритмическим путем на основе имеющихся опытных данных.

В свою очередь, вероятность состояния может находиться теоретическим путем из представления сложных событий в виде комбинации более простых событий. В зависимости от того, объединяются или совмещаются простые события, находят вероятность сложного события, используя теоремы сложения и умножения вероятностей.

Далее в данной главе вопросу теоретического и эмпирического определения вероятности характерных событий будет уделено особое внимание. Пока же достаточно факта существования распределений вероятностей таких событий. Так как ниже речь идет о вероятности любых событий, то индекс j в соотношении $w_j(p_1, p_2,...,p_n)$ будем опускать.

Для построения комплексных моделей принимаем гипотезу о непрерывности распределения вероятности состояния системы в области H^n. Другими словами, мы предполагаем существование скалярного поля статистической вероятности w в пространстве H^n вида $w = w(M)$, которое можно оценить по статистическим данным.

Предположим, что в области H^n можно задать комплексный индекс в виде аналитической функции $T(p_1, p_2,...,p_n)$, на основе которой будет формироваться математическая модель вероятностного пространства. При известном виде функции $T(p_1, p_2,...,p_n)$ и значениях переменных $p_1, p_2,...,p_n$ в области H^n формируем еще одно скалярное поле, которое ранее было названо средой моделирования.

При построении моделей, исходя из гипотез, приведенных в предыдущей главе, предполагаем, что в пространстве состояний H^n скалярные поля величин w и T однозначно связаны между собой. Данная связь представляется в виде следующих феноменологических соотношений $dw = c_l \cdot dT$. При справедливости принятых выше гипотез феноменологические описания статистических данных, представленных таблично-временными массивами информации, тесно связаны с уравнениями Пфаффа [4, 7, 65, 122, 123].

Выберем в области H^n произвольную точку M. Будем считать, что вблизи данной точки осуществляется элементарный процесс, в результате которого состояние объекта изменяется от начального M до конечного состояния M'. Тогда полный дифференциал величины w можно представить в виде:

$$dw = \left(\frac{\partial w}{\partial T}\right)_{p_2..p_n}\left(\frac{\partial T}{\partial p_1}\right)dp_1 + \left(\frac{\partial w}{\partial T}\right)_{p_1,p_3..p_n}\left(\frac{\partial T}{\partial p_2}\right)dp_2 + \ldots + \left(\frac{\partial w}{\partial T}\right)_{p_1..p_{n-1}}\left(\frac{\partial T}{\partial p_n}\right)dp_n \quad (3.1)$$

$$dw = c_1 \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial p_1}\right)dp_1 + c_2 \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial p_2}\right)dp_2 + \ldots + c_n \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial p_n}\right)dp_n, \quad (3.2)$$

где c_k – феноменологические величины, характеризующие процессы изменения состояний объектов при изменении показателей p_k, которые в самом общем случае зависят от переменных $p_1, p_2, \ldots, p_n$, однако в окрестности точки M их условно можно считать постоянными величинами; $k = 1, 2, \ldots, n$.

Введение индекса $T(p_1, p_2, \ldots, p_n)$ необходимо для построения комплексных моделей описания статистических данных в математическом виде. Уравнение Пфаффа (3.2) при постоянных величинах c_k зависит от вида функции T и распределений вероятности w.

Так как изучается распределение статистической вероятности, то можно представить комплексный индекс в виде геометрической вероятности пространства H^n или в виде меры относительных изменений:

$$T = \frac{p_1 \cdot p_2 \cdot \ldots \cdot p_n}{p_{1\max} \cdot p_{2\max} \cdot \ldots \cdot p_{n\max}}; \quad (3.3)$$

$$T = \frac{p_1 \cdot p_2 \cdot \ldots \cdot p_n}{p_{1_0} \cdot p_{2_0} \cdot \ldots \cdot p_{n_0}}, \quad (3.4)$$

где $p_{k\max}$, p_{k_0} – соответственно максимальные или некоторые опорные (пороговые, допустимые и т.д.) значения исходных показателей.

В первом случае следует определить максимальные значения наблюдаемых величин в выборке всех данных. Во втором случае, для анализа данных следует предложить некоторую опорную точку $M_0(p_{1_0}, p_{2_0}, \ldots, p_{n_0})$ и состояния всех остальных объектов соотнести с этой точкой.

Данные подходы определения комплексного индекса основываются на использовании принципа соответственных состояний. Этот принцип обобщает эмпирическое наблюдение, которое указывает на то, что для одних и тех же объектов определенной природы многие характеристики и показатели тесно связаны с некоторыми характерными свойствами для всех объектов приблизительно одинаково. При реализации этого принципа в процессе построения моделей показатели состояний некоторых объектов выбираются в качестве опорных и все остальные характеристики объектов соотносятся с этой точкой в изучаемом пространстве показателей.

Существуют различные способы формирования комплексных индексов при построении моделей систем. Это связано с особенностями той или иной предметной области, используемыми гипотезами или предположениями, а также сложившимися в научном сообществе представлениями или общепринятыми подходами. Кроме уравнений (3.3) и (3.4) также часто используются мультипликативные степенные функции и экспертные зависимости относительно исходных показателей соответственно виде:

$$T = \beta \cdot \left(\frac{p_1}{p_{1_0}}\right)^{\alpha_1} \cdot \left(\frac{p_2}{p_{2_0}}\right)^{\alpha_2} \cdot \ldots \cdot \left(\frac{p_n}{p_{n_0}}\right)^{\alpha_n}; \qquad (3.5)$$

$$T = \beta_1 \cdot \frac{p_1}{p_{1_0}} + \beta_2 \cdot \frac{p_2}{p_{2_0}} + \ldots + \beta_n \cdot \frac{p_n}{p_{n_0}}, \qquad (3.6)$$

где β_k – весовые или стандартизированные коэффициенты. Могут также быть предложены и другие виды функций для задания значений комплексного индекса, например, функции в виде среднего геометрического $T = \sqrt[n]{p_1 \cdot p_2 \cdot \ldots \cdot p_n}$ или среднегеометрического взвешенного, а также самые разные экспертные зависимости относительно индикаторов вида $\rho_k = \dfrac{p_k - p_{k\min}}{p_{k\max} - p_{k\min}}$.

Будем считать, что комплексный индекс $T(p_1, p_2, \ldots, p_n)$ может быть представлен в виде произведений функций, зависящих от показателей $p_1, p_2, \ldots, p_n$, а именно $T = \varphi_1(p_1) \cdot \varphi_2(p_2) \cdot \ldots \cdot \varphi_n(p_n)$. Эта гипотеза охватывает класс уравнений вида (3.3) – (3.5). В этом случае для уравнения

Пфаффа (3.2) существует интегрирующий делитель, который обращает данное уравнение в полный дифференциал. Интегрирующим делителем (3.2) будет функция $T=\varphi_1(p_1)\cdot\varphi_2(p_2)\cdot\ldots\cdot\varphi_n(p_n)$. Подставляя данную функцию в (3.2) и деля это уравнение на величину T, получим:

$$ds=\frac{dw}{T}=c_1\cdot\frac{\varphi_1'(p_1)}{\varphi_1(p_1)}dp_1+c_2\cdot\frac{\varphi_2'(p_2)}{\varphi_2(p_2)}dp_2+\ldots+c_n\cdot\frac{\varphi_n'(p_n)}{\varphi_n(p_n)}dp_n. \qquad (3.7)$$

Интегрируя уравнение (3.7), представим общий интеграл в виде:

$$s-s_0=c_1\cdot\ln\left(\frac{\varphi_1(p_1)}{\varphi_1(p_{1_0})}\right)+c_2\cdot\ln\left(\frac{\varphi_2(p_2)}{\varphi_2(p_{2_0})}\right)+\ldots+c_n\cdot\ln\left(\frac{\varphi_n(p_n)}{\varphi_n(p_{n_0})}\right). \qquad (3.8)$$

где s_0, $p_{1_0},\ldots,$ p_{n_0} – параметры опорного состояния.

Данную функцию состояния обычно называют энтропией. Таким образом, для скалярного поля вероятности $w(p_1,p_2,\ldots,p_n)$ при задании комплексного индекса произведением функций $T=\varphi_1(p_1)\cdot\varphi_2(p_2)\cdot\ldots\cdot\varphi_n(p_n)$ и справедливости функциональных связей в виде $dw=c_l\cdot dT$ может быть определено скалярное поле энтропии вида (3.8), причем функция энтропии является аддитивной величиной, каждое слагаемое которой зависит только от одной величины p_k. Из сказанного видно, что смысл поиска функции энтропии связан с преобразованием координат $p_1,p_2,\ldots,p_n$ таким образом, чтобы получить линейную аддитивную функцию относительно новых обобщенных координат вида:

$$s-s_0=c_1\cdot\psi_1(p_1)+c_2\cdot\psi_2(p_1)+\ldots+c_n\cdot\psi_n(p_1)=c_1\cdot q_1+c_2\cdot q_2+\ldots+c_n\cdot q_n, \qquad (3.9)$$

где $q_k=\psi_k(p_k)$ – преобразованные координаты в виде логарифмических функций.

Геометрически это означает, что энтропия в пространстве новых координат $q_1,q_2,\ldots,q_n$ согласно (3.9) приводится к линейным зависимостям, обладающим свойством аддитивности.

Таким образом, нелинейное преобразование координат при справедливости гипотез связи вероятности состояния системы с комплексным индексом вида $dw=c_l\cdot dT$ и возможности представления комплексного индекса мультипликативной функцией $T=\varphi_1(p_1)\cdot\varphi_2(p_2)\cdot\ldots\cdot\varphi_n(p_n)$ позволяет с помощью преобразования $ds=\frac{dw}{T}$

представить нелинейное скалярное поле вероятности в виде аддитивной линейной функции энтропии. Геометрически это выглядит так, что нелинейные многомерные линии скалярного поля вероятности состояния системы преобразуются в линейные многомерные линии скалярного поля энтропии этой системы в преобразованной системе координат.

Для уравнения Пфаффа (3.2) в пространстве H^n существует некоторое поле направлений, порождаемое скалярным полем статистической вероятности w и которое связано с линиями энтропии [4, 7, 122, 123]. Покажем справедливость данного факта. Так как принята гипотеза о существовании скалярного поля вероятности w, то градиент скалярной функции $w = w(p_1, p_2, ..., p_n)$ равен:

$$grad(w) = \left(\frac{\partial w}{\partial T}\right)_{e_1}\left(\frac{\partial T}{\partial p_1}\right)\cdot \mathbf{e}_1 + \left(\frac{\partial w}{\partial T}\right)_{e_2}\left(\frac{\partial T}{\partial p_2}\right)\cdot \mathbf{e}_2 + ... + \left(\frac{\partial w}{\partial T}\right)_{e_n}\left(\frac{\partial T}{\partial p_n}\right)\cdot \mathbf{e}_n, \quad (3.10)$$

откуда с учетом принятого положения, что $dw = c_l \cdot dT$, получим

$$grad(w) = c_1 \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial p_1}\right)\cdot \mathbf{e}_1 + c_2 \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial p_2}\right)\cdot \mathbf{e}_2 + ... + c_n \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial p_n}\right)\cdot \mathbf{e}_n, \quad (3.11)$$

где $\mathbf{e}_k$ – единичные векторы, направленные соответственно по осям координат $p_1, p_2, ..., p_n$ пространства состояний H^n.

В пространстве H^n функция энтропии согласно (3.8) образует преобразованное скалярное поле, поэтому градиент этого поля будет равен:

$$grad(s) = c_1 \cdot \frac{\varphi_1'(p_1)}{\varphi_1(p_1)}\cdot \mathbf{e}_1 + c_2 \cdot \frac{\varphi_2'(p_2)}{\varphi_2(p_2)}\cdot \mathbf{e}_2 + ... + c_n \cdot \frac{\varphi_n'(p_n)}{\varphi_n(p_n)}\cdot \mathbf{e}_n. \quad (3.12)$$

Обратим внимание, что для всех проекций векторов (3.11) и (3.12) выполняется следующее условие:

$$\frac{grad_k(w)}{grad_k(s)} = \frac{c_k \cdot \varphi_1(p_1)\cdot ...\cdot \varphi_k'(p_k)\cdot ...\cdot \varphi_n(p_n)}{c_k \cdot \varphi_k'(p_k)}\cdot \varphi_k(p_k) = T. \quad (3.13)$$

Из соотношения (3.13) следует пропорциональность одноименных проекций векторов $grad(w)$ и $grad(s)$. Это говорит о том, что в каждой точке M пространства H^n данные векторы параллельны, причем

$$grad(s) = \frac{1}{T}\cdot grad(w). \quad (3.14)$$

Получим дифференциальное уравнение для описания скалярного поля вероятности. Из соотношения $T=\varphi_1(p_1)\cdot\varphi_2(p_2)\cdot\ldots\cdot\varphi_n(p_n)$ имеем следующие зависимости:

$$\frac{\partial T}{\partial p_k}=\frac{\varphi_1(p_1)\cdot\varphi_2(p_2)\cdot\ldots\cdot\varphi_k'(p_k)\cdot\ldots\cdot\varphi_n(p_n)}{\varphi_k(p_k)}\cdot\varphi_k(p_k),\text{ откуда}$$

$$\frac{\partial T}{\partial p_k}=\frac{\varphi_k'(p_k)}{\varphi_k(p_k)}\cdot T \quad \text{и} \quad \frac{1}{c_k}\left(\frac{\partial w}{\partial p_k}\right)=\frac{\varphi_k'(p_k)}{\varphi_k(p_k)}\cdot T,\ \text{так как}\ \frac{\partial w}{\partial p_k}=c_k\cdot\left(\frac{\partial T}{\partial p_k}\right). \quad (3.15)$$

Суммируя соотношения (3.15) для всех n получим линейное неоднородное уравнение в частных производных первого порядка вида:

$$\frac{\varphi_1(p_1)}{c_1\cdot\varphi_1'(p_1)}\left(\frac{\partial w}{\partial p_1}\right)+\frac{\varphi_2(p_2)}{c_2\cdot\varphi_2'(p_2)}\left(\frac{\partial w}{\partial p_2}\right)+\ldots+\frac{\varphi_n(p_n)}{c_n\cdot\varphi_n'(p_n)}\left(\frac{\partial w}{\partial p_n}\right)=n\cdot T. \quad (3.16)$$

В общем случае решение уравнения (3.16) осуществляется методом характеристик [7, 65, 69], которые определяются системой обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$ds=c_1\cdot\varphi_1'(p_1)\frac{dp_1}{\varphi_1(p_1)}=c_2\cdot\varphi_2'(p_2)\frac{dp_2}{\varphi_2(p_2)}=\ldots=c_n\cdot\varphi_n'(p_n)\frac{dp_n}{\varphi_n(p_n)}=\frac{dw}{n\cdot T}, \quad (3.17)$$

где s – параметр, который является энтропией в представлении (3.7). Если сложить все слагаемые уравнения (3.17) кроме последнего, то получим в точности уравнение (3.7).

Известно, что для уравнения (3.16) характеристики определяются системой уравнений (3.17), а семейство поверхностей, ортогональных этим характеристикам, определяется из скалярного произведения вектора

$$\vec{W}=\frac{\varphi_1(p_1)}{c_1\cdot\varphi_1'(p_1)}\mathbf{e_1}+\frac{\varphi_2(p_2)}{c_2\cdot\varphi_2'(p_2)}\mathbf{e}_2+\ldots+\frac{\varphi_n(p_n)}{c_n\cdot\varphi_n'(p_n)}\mathbf{e}_n \quad (3.18)$$

и единичного вектора $\mathbf{e}=\mathbf{e_1}\cdot dp_1+\mathbf{e}_2\cdot dp_2+\ldots+\mathbf{e}_n\cdot dp_n$, а именно $\left(\vec{W}\cdot\mathbf{e}\right)=0$.

Последнее соотношение можно представить в развернутом виде многомерного уравнения Пфаффа:

$$\frac{\varphi_1(p_1)}{c_1\cdot\varphi_1'(p_1)}dp_1+\frac{\varphi_2(p_2)}{c_2\cdot\varphi_2'(p_2)}dp_2+\ldots+\frac{\varphi_n(p_n)}{c_n\cdot\varphi_n'(p_n)}dp_n=0. \quad (3.19)$$

Если данное уравнение приводится к полному дифференциалу, то существует потенциал $P(p_1,p_2,\ldots,p_n)=C$ пространства H^n, который можно представить в виде семейства поверхностей, ортогональных линиям энтропии $(s=const)$. Для некоторых видов функций комплексного индекса можно получить простые функции потенциала.

На основе значений энтропии s и потенциал P можно осуществлять сравнительную оценку состояния объектов между собой. Эти величины являются функциями точки M (функциями состояния). Данные функции состояния определяют естественные криволинейные координаты в преобразованном пространстве, при этом каждый объект (в процессе своего изменения и развития) будет занимать некоторое положение относительно этих координат [7].

Таким образом, благодаря нелинейному преобразованию координат, пространство H^n, где представлено скалярное поле вероятности состояния системы, может быть комплексно преобразовано в линейное пространство относительно величин энтропии и потенциала пространства состояний изучаемой системы. Это позволяет объективно провести многопараметрическое ранжирование объекта среди множества других объектов, используя для анализа данные функции состояния.

3.3 Формулировка основных зависимостей для комплексной оценки

Получим основные уравнения и соотношения для комплексной оценки природно-антропогенных систем. В данном варианте построения теории важным является выбор среды моделирования, исходя из задания различных видов функций для индекса T. Решение уравнения Пфаффа (3.19) при постоянных величинах c_k зависит от вида функции $T(p_1, p_2, ..., p_n)$.

Так как изучаются распределения статистической вероятности различных событий, то рационально представить эту функцию в виде геометрической вероятности пространства H^n или в виде меры относительных изменений согласно (3.3) и (3.4). Так как данные уравнения идентичны, далее рассмотрим уравнение (3.4), для которого $T = \dfrac{p_1 \cdot p_2 \cdot \ldots \cdot p_n}{p_{1_0} \cdot p_{2_0} \cdot \ldots \cdot p_{n_0}}$. В данном случае величины $p_1, p_2, ..., p_n$ можно рассматривать как некоторые пороговые (безопасные) уровни показателей, позволяющие выделить области опасных состояний системы.

Для данного комплексного индекса согласно (3.7) – (3.8) энтропию состояния системы можно представить следующим образом:

$$ds = \frac{dw}{T} = c_1 \cdot \frac{dp_1}{p_1} + c_2 \cdot \frac{dp_2}{p_2} + \ldots + c_n \cdot \frac{dp_n}{p_n}, \qquad (3.20)$$

$$s - s_0 = c_1 \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_{1_0}}\right) + c_2 \cdot \ln\left(\frac{p_2}{p_{2_0}}\right) + \ldots + c_n \cdot \ln\left(\frac{p_n}{p_{n_0}}\right). \qquad (3.21)$$

В свою очередь, согласно (3.19), потенциал $P(p_1, p_2, \ldots, p_n) = C$ может быть найден из уравнения:

$$\frac{p_1}{c_1} \cdot dp_1 + \cdot \frac{p_2}{c_2} dp_2 + \ldots + \cdot \frac{p_n}{c_n} dp_n = 0 \quad \text{или} \qquad (3.22)$$

$$P(p_1, p_2, \ldots, p_n) = \frac{1}{2}\left(\frac{p_1^2 - p_{1_0}^2}{c_1} + \frac{p_2^2 - p_{2_0}^2}{c_2} + \ldots + \frac{p_n^2 - p_{n_0}^2}{c_n}\right), \qquad (3.23)$$

где принято, что $P(p_{1_0}, p_{2_0}, \ldots, p_{n_0}) = 0$.

Таким образом, для комплексного индекса вида (3.3) – (3.4) можно ввести обобщенные координаты в виде энтропии и потенциала, которые позволят в преобразованном пространстве координат линеаризовать нелинейное скалярное поле вероятности состояния системы.

Рассмотрим теперь уравнение (3.5) для комплексного индекса $T = \beta \cdot \left(\frac{p_1}{p_{1_0}}\right)^{\alpha_1} \cdot \left(\frac{p_2}{p_{2_0}}\right)^{\alpha_2} \cdot \ldots \cdot \left(\frac{p_n}{p_{n_0}}\right)^{\alpha_n}$. Можно показать, что для данного уравнения при $\beta = 1$ энтропия состояния системы представляется в виде уравнения:

$$s - s_0 = c_1 \cdot \alpha_1 \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_{1_0}}\right) + c_2 \cdot \alpha_2 \cdot \ln\left(\frac{p_2}{p_{2_0}}\right) + \ldots + c_n \cdot \alpha_n \cdot \ln\left(\frac{p_n}{p_{n_0}}\right), \qquad (3.24)$$

а потенциал состояния системы в виде уравнения:

$$P(p_1, p_2, \ldots, p_n) = \frac{1}{2}\left(\frac{p_1^2 - p_{1_0}^2}{c_1 \cdot \alpha_1} + \frac{p_2^2 - p_{2_0}^2}{c_2 \cdot \alpha_2} + \ldots + \frac{p_n^2 - p_{n_0}^2}{c_n \cdot \alpha_n}\right). \qquad (3.25)$$

В свою очередь, при представлении комплексного индекса в виде уравнения (3.6) $T = \beta_1 \cdot \frac{p_1}{p_{1_0}} + \beta_2 \cdot \frac{p_2}{p_{2_0}} + \ldots + \beta_n \cdot \frac{p_n}{p_{n_0}}$ энтропия и потенциал могут быть представлены следующим образом:

$$s - s_0 = \frac{c_1}{n} \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_{1_0}}\right) + \frac{c_2}{n} \cdot \ln\left(\frac{p_2}{p_{2_0}}\right) + \ldots + \frac{c_n}{n} \cdot \ln\left(\frac{p_n}{p_{n_0}}\right), \tag{3.26}$$

$$P(p_1, p_2, \ldots, p_n) = \frac{1}{2}\left(\frac{p_1^2 - p_{1_0}^2}{c_1} + \frac{p_2^2 - p_{2_0}^2}{c_2} + \ldots + \frac{p_n^2 - p_{n_0}^2}{c_n}\right). \tag{3.27}$$

Соответствующие зависимости могут быть получены, исходя из однородности функции (3.6) и справедливости уравнения (3.16) для случая, когда степень однородности функции (3.6) принимается равной единице.

Таким образом, используя предложенную теорию комплексной оценки и задавая различные функции комплексного индекса T, можно преобразовывать нелинейное пространство вероятности состояний системы в линейное пространство и потом проверять полученные зависимости на адекватность путем обработки имеющихся опытных данных об изменении и развитии той или иной системы и эмпирического определения величин c_k.

Приведенные ранее зависимости (3.3) – (3.6) являются достаточно простыми. Надо отметь, что энтропия состояния системы согласно (3.8) может быть определена для самых различных функций комплексного индекса, представленных в виде произведений функций относительно показателей $T = \varphi_1(p_1) \cdot \varphi_2(p_2) \cdot \ldots \cdot \varphi_n(p_n)$. В свою очередь, решение для потенциала будет определяться из соотношения (3.19).

Поэтому в каждом конкретном случае решения прикладной задачи необходимо обосновывать выбор индекса T для комплексной оценки и определять конкретные зависимости энтропии s и потенциала P. Теоретически получить соответствующие зависимости достаточно легко, однако оценка адекватности данных зависимостей по отношению к опытным данным является не совсем простой задачей. В общем случае мы приходим к необходимости использовать при обработке опытных данных обобщенные координаты в виде энтропии и потенциала. Если эмпирически

с учетом принятых гипотез удастся получить качественные регрессионные зависимости, позволяющие связать вероятность состояния системы с энтропией пространства состояний $w = \varphi(s)$, где s – энтропия в виде выражения (3.8), то данные могут быть преобразованы в линейное пространство и возможна комплексная оценка объектов на основе новых преобразованных переменных. При этом в уравнении $w = \varphi(s)$ феноменологические величины c_k определяются по опытным данным методами нелинейной регрессии.

Область применения данного метода охватывает медленно меняющиеся во времени процессы, для которых существуют функции распределения вероятностей характерных событий $w = w(p_1, p_2, ..., p_n)$ и непрерывные производные $c_l = dw/dT$. Важной особенностью применения метода является наличие структурированных данных наблюдений для изучаемых природно-антропогенных систем, которые могут быть представлены в таблично-временном виде. Основные процессы, характерные для природно-антропогенных систем, обычно медленно протекают во времени, так как показатели этих систем достаточно устойчивы. Практика анализа данных также показывает, что для большинства систем могут быть получены функции распределений вероятности для различных характерных событий, поэтому вполне возможно установление фундаментальных закономерностей на основе феноменологических описаний процессов изменения состояний систем.

Далее на основе предложенной теории комплексной оценки будут показаны процедуры обработки эмпирических данных для различных природно-антропогенных систем.

3.4 Определение вероятности событий при наблюдении показателей природно-антропогенных систем

Из приведенного выше материала следует, что изучение связей между состояниями системы и их вероятностями возможно при наличии описания поведения изучаемой системы в виде многомерных

распределений различных событий, связанных с наблюдением совокупности атрибутивных показателей или других важных величин.

На основе применения понятия уравнения состояния системы, представленного в виде вероятностей или рисков $w_j = w_j(p_1, p_2, ..., p_n)$ относительно показателей p_k и различных характерных событий j (как неопасных, так и опасных), возможно создание теории комплексной оценки, которая может быть применима по отношению к природно-антропогенным системам. Для того чтобы построить уравнение состояния системы необходимо в процессе анализа выделить характерные события j и оценить их вероятности.

Определим события, которые могут иметь отношение к статистической информации о состоянии систем, представленной в виде таблично-временных массивов данных. Как указывалось ранее, такие массивы имеют структуру таблиц в виде матриц «объекты – показатели» (рис. 2.1). Для любого объекта каждый показатель в таблично-временном массиве данных будет представлен в этом случае временным рядом из опытных точек в количестве равном числу таблиц в массиве данных.

Применительно к такой информации можно выделить следующие основные события и привести зависимости для определения их вероятностей.

1. В любой момент наблюдения каждого конкретного показателя системы реализуется событие, связанное с определением значения этого показателя как характеристической величины данного события. Наблюдения осуществляются применительно к каждому объекту, и все последовательности наблюдений для любого показателя представляются временными рядами, при этом события наблюдения определенного показателя в разных таблицах базы данных являются несовместными.

Для случайной величины P_k вероятность события, что наблюдаемый показатель меньше некоторого заданного значения p_k, определяется из функции распределения $w(p_k) = w(P_k < p_k)$, которая находится по данным наблюдений. Одномерное эмпирическое распределение данной функции может быть легко найдено по имеющимся статистическим данным. С этой целью для *i*-того выбранного объекта все опытные данные группируют и строят гистограмму относительных частот. Весь наблюдаемый диапазон

показателя p_k разбивается на $7-12$ одинаковых интервалов и определяется число наблюдений, попадающих в каждый i-тый интервал. Далее находится относительная частота события $P_k < p_k$ по формуле $w = n_i / N$, где n_i – число наблюдений, попавших в i-тый интервал группирования, N – общее число наблюдений. Эмпирическая функция распределения величины строится для кумулятивных относительных частот. На рисунке 3.1. показана гистограмма плотности вероятности эмпирической функции распределения для случайной величины концентрации диоксида азота при загрязнении атмосферного воздуха в городе Донецке в 2003 году.

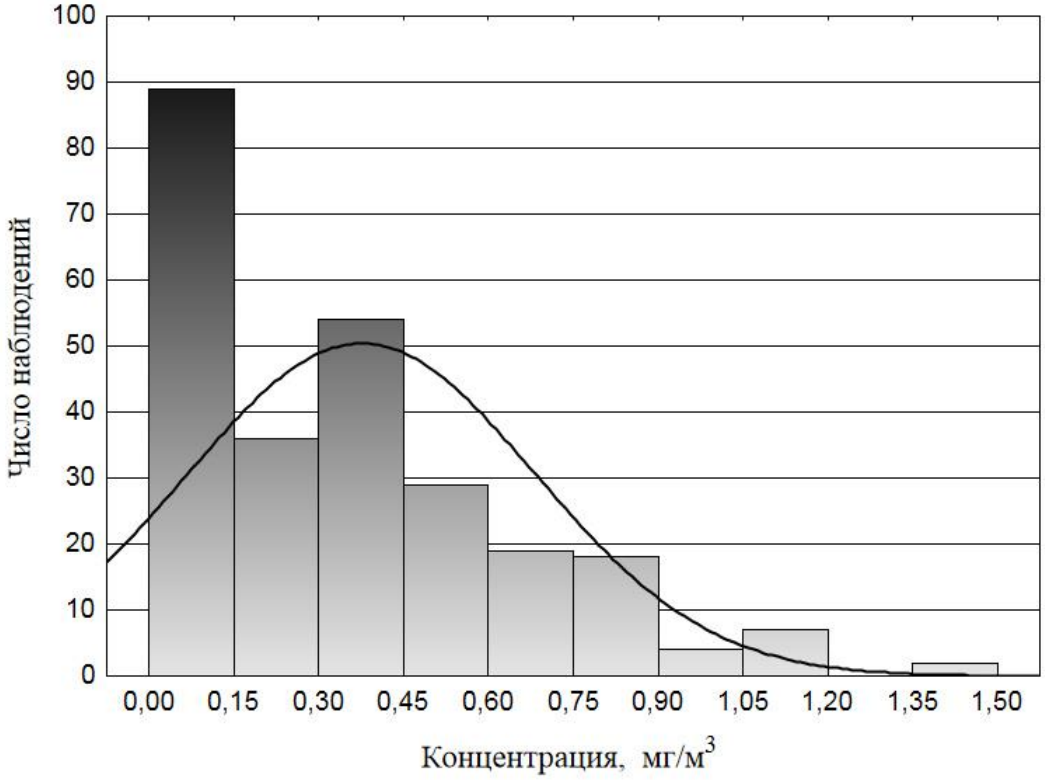

Рисунок 3.1. – Гистограмма плотности вероятности эмпирической функции распределения концентрации диоксида азота на посту № 5 при загрязнении атмосферного воздуха в г. Донецк в 2003 году

Для одного объекта все наблюдаемые события некоторых значений одного показателя (за год, месяц, сутки и т.д.) образуют полную группу. Для дискретных событий $\sum_{i=1}^{t} w_i = 1$, для непрерывных случайных величин

$\int_0^\infty f(p_k)dp_k = 1$, где i – текущий номер наблюдения событий в разные моменты времени, t – количество наблюдений (число членов временного ряда), а $f(p_k)$ – функция распределения случайной величины, причем $p_k \geq 0$, так как показатели, характеризующие состояния системы, обычно положительные величины.

Соответствующие одномерные распределения вероятностей для одного показателя по данным временного ряда (для разных таблиц базы данных) легко находятся на основе имеющихся данных с использованием программных продуктов статистического анализа данных.

2. Если контролируются значения одного показателя применительно к группе объектов (относятся к одной таблице данных), то для каждого конкретного показателя реализуются совместные события, связанные с наблюдением значений этого показателя для разных объектов. Все события также образуют полную группу или их вероятности могут быть нормируемы. Для дискретных событий $\sum_{i=1}^{m} w_i = 1$, для непрерывных случайных величин $\int_0^\infty f(p_k)dp_k = 1$, где i – номер объекта, p_k – некоторый показатель состояния природно-антропогенной системы, m – количество объектов для изучаемой природно-антропогенной системы, а $f(p_k)$ – функция распределения случайной величины, оцениваемая по данным для всех m объектов. Все события наблюдения некоторого показателя для разных объектов в данном случае можно рассматривать как совместные, так как они привязываются к одному и тому же моменту времени – суткам, месяцам, годам.

Соответствующие одномерные распределения вероятностей для одного показателя по данным для различных объектов (для одной таблицы базы данных) также легко находятся с использованием программных продуктов статистического анализа данных. На рисунке 3.2 показан график эмпирической функции распределения случайной величины, характеризующей детскую смертность в странах мира в 2013 году.

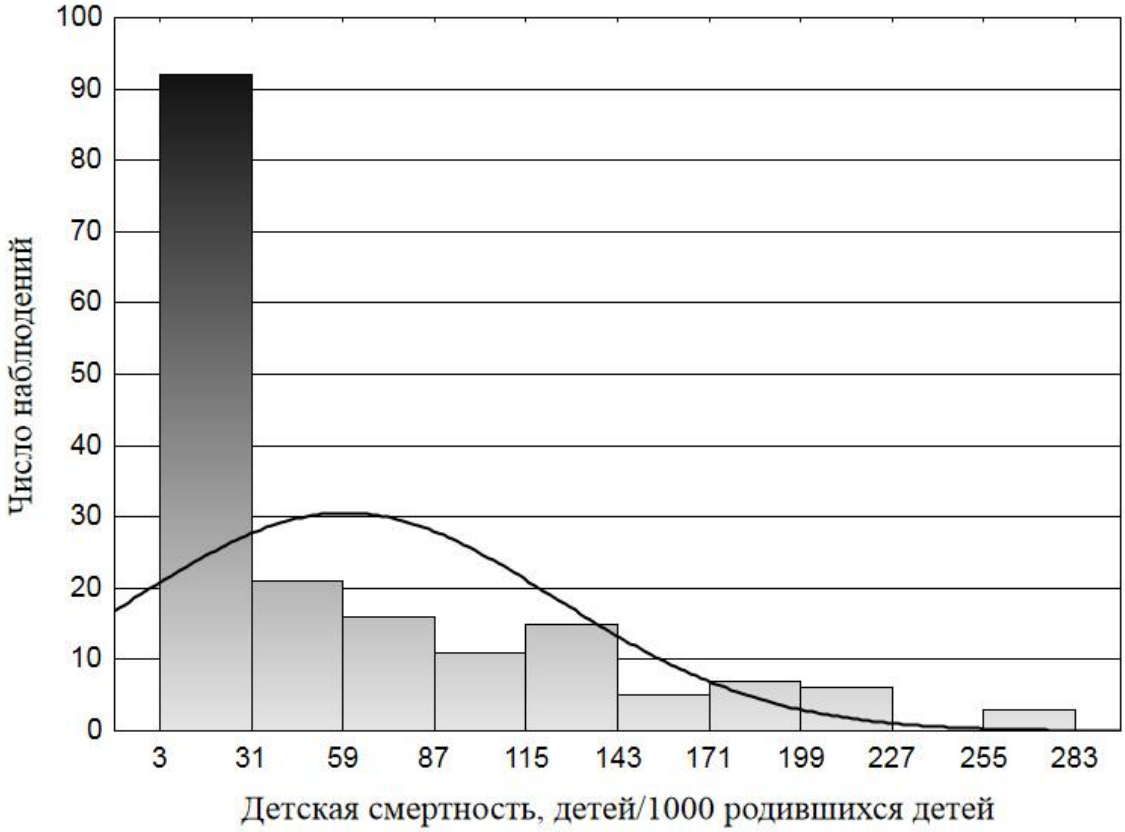

Рисунок 3.2. – Гистограмма плотности вероятности эмпирической функции распределения детской смертности в странах мира в 2013 году

3. В любой момент контроля за состоянием системы может быть реализовано сложное совместное событие одновременного наблюдения нескольких показателей. Наблюдения осуществляются применительно к каждому объекту, и при реализации такого события может формироваться множество комбинаций совместного наблюдения разных показателей. Все такие события относятся к одной и той же таблице данных и являются совместными. Подобная задача при комплексной оценке возникает в случае выделения из имеющейся базы данных нескольких атрибутивных показателей (обычно от трех до пяти), относительно которых строится вероятностная модель системы. Вероятности таких сложных совместных событий могут быть определены как теоретическим путем на основе применения теорем умножения вероятностей, так и алгоритмически.

4. Теоретическое определение вероятности совместных событий зависит от того, являются ли события независимыми или зависимыми.

В случае, если все события независимы, вероятность совместного события равна произведению вероятностей более простых событий:

$$w_k(p_1,...,p_k) = w(p_1)\cdot w(p_2)\cdot ...\cdot w(p_k), \qquad (3.28)$$

где $p_1,...,p_k$ – некоторый выбранный перечень атрибутивных показателей. Одномерные распределения $w(p_k)$ определяются по статистическим данным для каждого показателя в отдельности.

Для зависимых событий вероятность сложного события будет равна

$$w_k(p_1,...,p_k) = w(p_1)\cdot w_{p_1}(p_2)\cdot ...\cdot w_{p_{k-1}}(p_k), \qquad (3.29)$$

где условные вероятности $w_{p_{i-1}}(p_i)$ вычисляются в предположении, что все предыдущие события, связанные с наблюдением показателей, произошли. Определить данные условные вероятности теоретически сложно, поэтому их лучше оценивать по опытным данным путем алгоритмического определения относительных частот сложных и более простых событий (например, вероятностей $w_k(p_1,...,p_k)$ и $w(p_1)$) и изучения взаимосвязей между ними.

5. Вероятности сложных совместных событий одновременного наблюдения нескольких показателей природно-антропогенной системы могут быть определены алгоритмическим путем при наличии достаточного количества статистических данных. Построить гистограммы совместных событий для двух показателей можно с использованием программных продуктов статистического анализа данных (например, Statistica). На рисунке 3.3 представлена гистограмма частот совместных событий одновременного наблюдения двух переменных.

Если количество показателей составляет более двух, то для оценки вероятностей совместных событий необходимо использовать вычислительные алгоритмы. Статистические вероятности для сложного события одновременного наблюдения нескольких выбранных показателей могут быть найдены с использованием различных алгоритмов сортировки, группировки и подсчета частот благоприятных событий в общей выборке всех наблюдений. Подобные алгоритмы позволяют (для выборки наблюдений) определить статистическую вероятность совместного события.

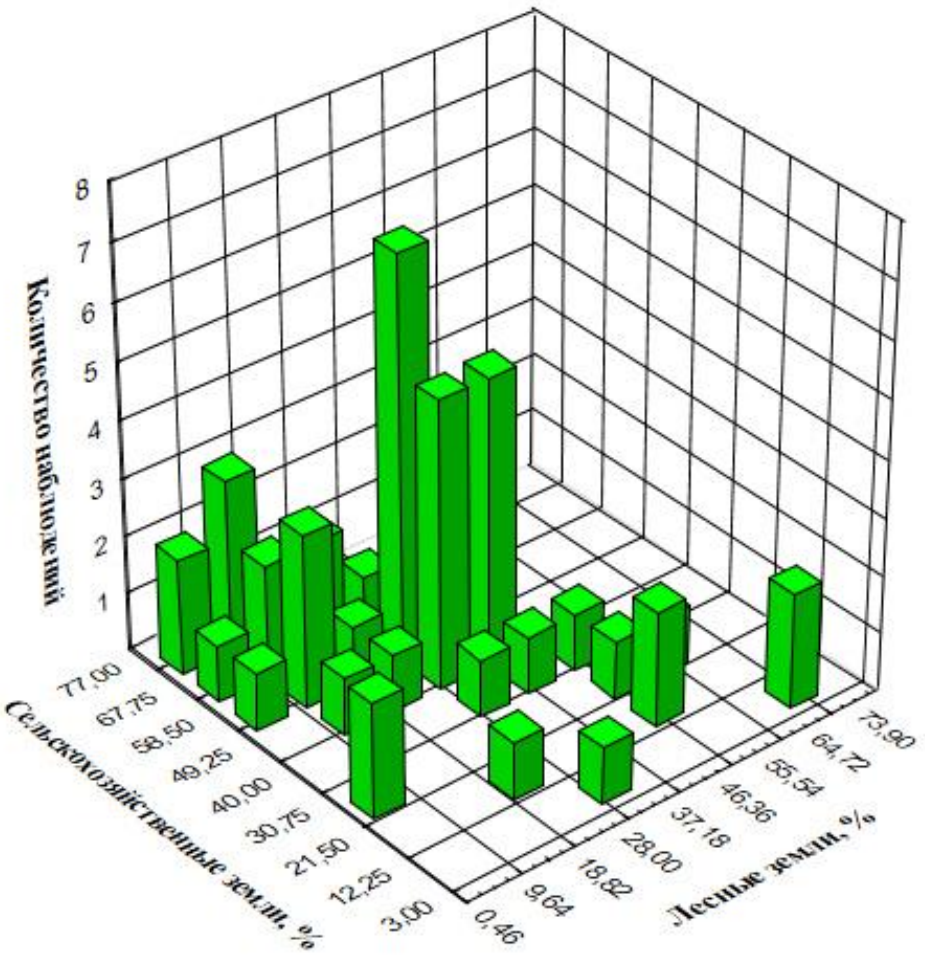

Рисунок 3.3. – Гистограмма частот наблюдения совместных событий, связанных с наличием сельскохозяйственных и лесных земель в странах Европы

Существует, по крайней мере, несколько таких возможных алгоритмов. Например, первый алгоритм предполагает выделение многомерных параллелепипедов с вершинами, образованными опытными точками, и последующий подсчет числа точек, попавших в эти параллелепипеды. Для примера на рисунке 3.4 число благоприятных данных характеризуется количеством точек, попавших в выделенную на рисунке область, а общее число данных характеризуется количеством всех наблюдаемых точек. Это позволяет определить относительные частоты наблюдаемых событий.

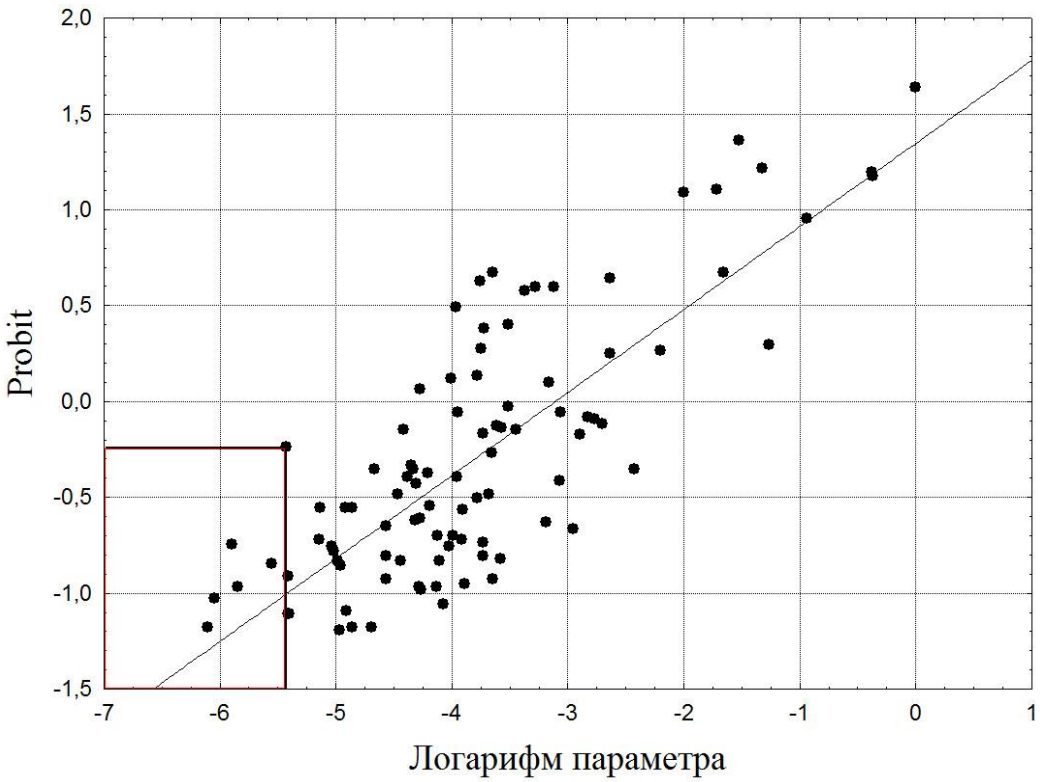

Рисунок 3.4. – График, отражающий определение относительных частот совместных событий непосредственным подсчетом

Второй более строгий алгоритм позволяет разбить всю наблюдаемую область H^n на многомерные параллелепипеды, исходя из заданного количества (обычно одинакового для всех p_k) интервалов группирования для каждой переменной p_k. После этого подсчитываются относительные частоты событий, которые равны отношению количества опытных точек, попавших в заданные многомерные параллелепипеды, к общему числу всех наблюдаемых точек. Статистическая вероятность принимается в виде кумулятивных относительных частот изучаемых совместных событий, например, при совместном наблюдении нескольких показателей.

Соответствующие скрипты применительно к использованию в программном продукте Statistica для первого и второго случаев приведены в работе [4]; скрипт определения вероятности одновременного наблюдения двух показателей, выполненный в Visual Basic, представлен в приложении Б. В работе [7] также даны алгоритмы непосредственного подсчета относительных частот совместных событий для многомерных случаев.

6. Для одной таблицы данных или для различных временных рядов показателей (разные таблицы данных) могут быть получены вероятности различных событий, которые, в свою очередь, могут быть взаимосвязаны. Поэтому вероятности простых и сложных событий наблюдения различных показателей природно-антропогенной системы следует изучить на взаимосвязь между собой, используя корреляционный анализ данных. Это позволяет проанализировать связи событий наблюдения атрибутивных показателей с различными событиями наблюдения других показателей, не входящих в перечень атрибутивных.

Также можно изучить связи вероятностей отдельных двух простых и сложных событий между собой. На основе данного подхода может быть получено множество уравнений состояния для конкретных природно-антропогенных систем, которые будут характеризовать данные системы по самым разным аспектам.

Если в общем случае исследовать взаимосвязь двух простых событий, где каждое событие может быть представлено событием наблюдения одного показателя природно-антропогенной системы, то уравнение связи вероятностей будет иметь вид:

$$w_2 = F(w_1). \tag{3.30}$$

На рисунке 3.5 представлен график зависимости вероятностей двух событий. Аналогичным образом можно изучать взаимосвязь двух сложных событий, где каждое событие может быть представлено совместным событием наблюдения нескольких показателей.

Применяя данный подход, в соответствии с (3.29) можно эмпирическим путем определить условные вероятности, используя теоретическую зависимость $w_2 = w_{2,1} \cdot w_1$ и значения найденных вероятностей w_1 и w_2 для двух простых или сложных событий. Аналогичным образом при наличии значимых причинно-следственных связей можно искать множественные взаимосвязи между вероятностями самых разных событий, например, в виде уравнений множественной регрессии вероятностей сложных событий (w) относительно вероятностей простых событий (w_i) вида $w = F(w_1, w_2, ..., w_k)$.

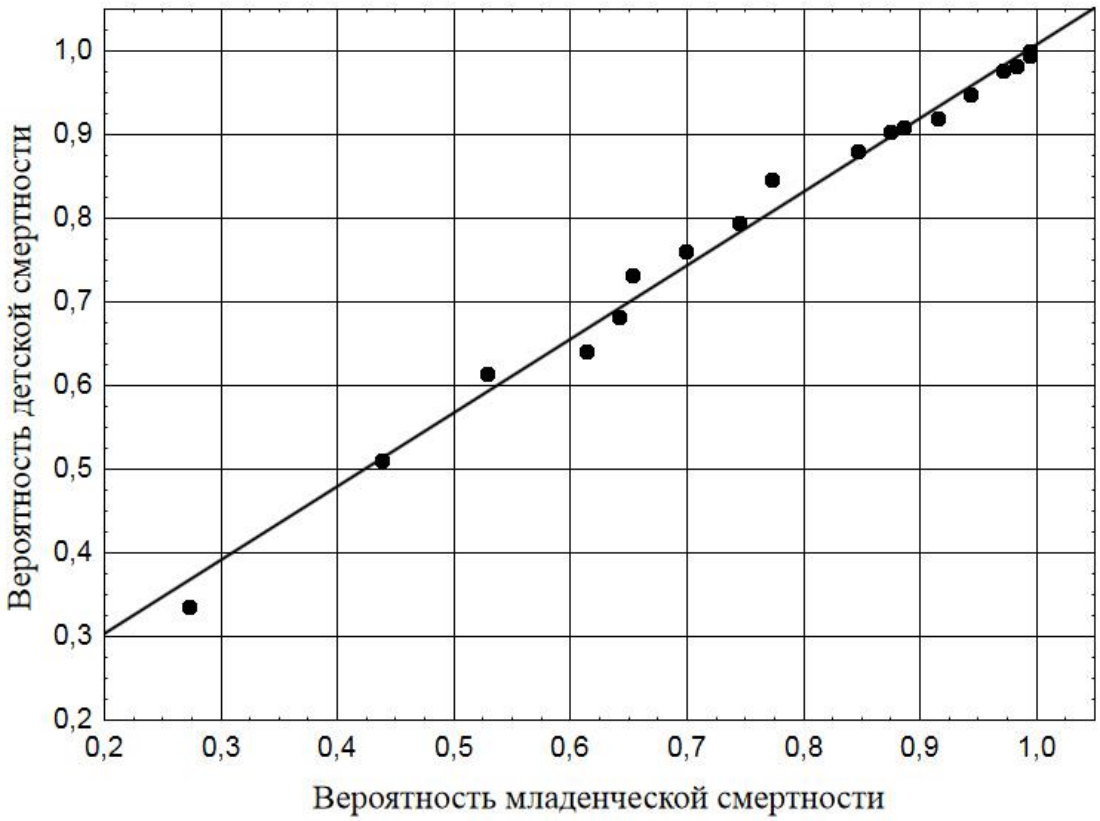

Рисунок 3.5. – Зависимость вероятности событий, связанных с младенческой и детской смертностью в странах мира в 2013 году

Таким образом, из приведенного выше материала видно, что построение феноменологических моделей природно-антропогенных систем предполагается основывать на использовании обширных данных наблюдений, применении понятия уравнения состояния системы в виде многомерных распределений вероятности совместных событий наблюдения атрибутивных показателей, а также путем алгоритмического определения таких вероятностей по имеющимся статистическим данным. Используя ряд теоретических гипотез, данный подход позволяет развить методологию комплексной оценки природно-антропогенных систем и разработать расчетные методики для анализа таких систем. Все это дает возможности создавать модели различных систем, состояния которых характеризуются множеством параметров, несущими в себе социально-экономическую, промышленную, ресурсную, экологическую, культурную и другую информацию.

3.5. Вероятностные закономерности формирования природно-антропогенных процессов

Изучение процессов в природно-антропогенных системах можно основывать на рассмотрении состояния системы как сложного события одновременного наблюдения нескольких атрибутивных показателей. Вероятности таких событий могут быть связаны с вероятностями других сложных событий, в том числе и опасных, характеризующих самые разные процессы изменения состояний природно-антропогенных систем.

Предположим, что применительно к таблично-временной базе данных статистических показателей некоторой природно-антропогенной системы рассматривается совместное событие наблюдения двух выбранных атрибутивных показателей p_1 и p_2. Обозначим данное совместное событие как j. Пусть событие j_1 – это наблюдение показателя p_1, а событие j_2 – наблюдение показателя p_2. Соответствующие одномерные вероятностные распределения при реализации событий j_1 и j_2, связанных со значениями характеристических величин p_1 и p_2 данных событий, могут быть легко найдены по опытным данным. Для каждого показателя эмпирические распределения $w_1(p_1)$ и $w_2(p_2)$ определяются по отношению ко всем объектам каждой таблицы данных, путем группировки данных и подсчета кумулятивных относительных частот.

Будем считать, что события j_1 и j_2 независимы. В этом случае вероятность сложного события j совместного выполнения событий j_1 и j_2 будет равна $w(p_1, p_2) = w_1(p_1) \cdot w_2(p_2)$. Пусть изучаемая природно-антропогенная система в окрестности произвольного состояния M совершает некоторый элементарный процесс l, при этом изменение вероятности состояния системы будет равно:

$$dw = w_2 \cdot dw_1 + w_1 \cdot dw_2. \qquad (3.31)$$

Предположим, что вероятности событий j, j_1 и j_2 могут быть изучены в одном многомерном вероятностном пространстве. Если в окрестности точки M принять гипотезу о феноменологической связи вероятностей с общим комплексным индексом $T(p_1, p_2)$ для всех трех

событий $\left(dw_i = c_{l,i} \cdot dT\right)$, то получим следующие зависимости: $dw = c_{w1} \cdot \frac{\partial T}{\partial p_1} dp_1 + c_{w2} \cdot \frac{\partial T}{\partial p_2} dp_2$; $dw_1 = c_1 \cdot \frac{\partial T}{\partial p_1} dp_1$ и $dw_2 = c_2 \cdot \frac{\partial T}{\partial p_2} dp_2$. Подставляя данные выражения в (3.31), определим дифференциал вероятности сложного события в виде:

$$dw = c_{w1} \cdot \frac{\partial T}{\partial p_1} dp_1 + c_{w2} \cdot \frac{\partial T}{\partial p_2} dp_2 = w_2 \cdot c_1 \cdot \frac{\partial T}{\partial p_1} dp_1 + w_1 \cdot c_2 \cdot \frac{\partial T}{\partial p_2} dp_2, \quad (3.32)$$

откуда $c_{w1} = w_2 \cdot c_1$ и $c_{w2} = w_1 \cdot c_2$.

Таким образом, при справедливости гипотезы о независимости событий j_1 и j_2 феноменологические величины c_{w1} и c_{w2} в распределении вероятности сложного совместного события могут быть определены по аналогичным величинам, найденным для более простых событий j_1 и j_2, и значениям вероятностей этих событий. Для практических расчетов в области оценки риска это дает возможность по характеристикам одномерных распределений получать теоретические модели риска сложных совместных событий и сравнивать полученные теоретическим путем значения вероятностей со значениями вероятностей, полученных непосредственным подсчетом по опытным данным.

Рассмотрим теперь случай, когда события j_1 и j_2 зависимы. Вероятность сложного события совместной реализации событий j_1 и j_2 будет равна $w(p_1, p_2) = w_{21}(p_1, p_2) \cdot w_1(p_1)$ или $w(p_1, p_2) = w_{12}(p_1, p_2) \cdot w_2(p_2)$, где $w_{21}(p_1, p_2)$ – условная вероятность того, что событие 2 произойдет при условии совершения события 1; $w_{12}(p_1, p_2)$ – условная вероятность того, что событие 1 произойдет при условии совершения события 2. Из данных выражений видно, что вероятность w изначально можно рассматривать как функцию двух переменных p_1 и p_2. В этом случае, если изучаемая природно-антропогенная система в окрестности произвольного состояния M совершает элементарный процесс l, то справедливо уравнение:

$$dw = \frac{\partial w}{\partial p_1} dp_1 + \frac{\partial w}{\partial p_2} dp_2 = W_1(p_1, p_2) dp_1 + W_2(p_1, p_2) dp_2. \quad (3.33)$$

Так же, как и ранее, предположим, что вероятности событий j, j_1 и j_2 могут быть изучены в одном многомерном вероятностном

пространстве. При справедливости соответствующей гипотезы о феноменологической связи вероятностей с общим комплексным индексом $T(p_1, p_2)$ будем иметь те же зависимости, что и ранее: $dw = c_{w1} \cdot \frac{\partial T}{\partial p_1} dp_1 + c_{w2} \cdot \frac{\partial T}{\partial p_2} dp_2$; $dw_1 = c_1 \cdot \frac{\partial T}{\partial p_1} dp_1$ и $dw_2 = c_2 \cdot \frac{\partial T}{\partial p_2} dp_2$. Предположим, что вероятность состояния системы при зависимых событиях может быть выражена через вероятность состояния системы, в случае если эти же события рассматривать как независимые, тогда: $w = f(u) = f(w_1 \cdot w_2)$, где $f(u)$ – функция связи, устанавливаемая эмпирическим путем. Для этого случая дифференциал вероятности сложного события можно представить в виде: $dw = \varphi \cdot (w_2 \cdot dw_1 + w_2 \cdot dw_1)$, где $\varphi = df/du$. Подставляя приведенные выше выражения в соотношение дифференциала вероятности, получим что: $c_{w1} = \varphi \cdot w_2 \cdot c_1$ и $c_{w2} = \varphi \cdot w_1 \cdot c_2$.

Видно, что при справедливости гипотезы о зависимости событий j_1 и j_2 величины c_{w1} и c_{w2} в распределении вероятностей сложного события могут быть также определены по аналогичным величинам, найденным для более простых событий j_1 и j_2, и значениям вероятностей этих событий. Данные результаты могут быть использованы при оценке риска сложных событий. Аналогичные зависимости можно получить для случаев, когда количество событий, формирующих совместное событие, больше двух, и когда сложные совместные события взаимосвязаны между собой.

Полученные результаты могут быть использованы при оценке опасности и риска. В теории безопасности существуют различные методы оценки, основанные на применении тех или иных индексов опасности при установлении риска различных видов воздействий на население, персонал или природную среду. Примерами таких показателей являются индекс Доу, используемый при оценке рисков пожароопасности и взрывоопасности, коэффициент пороговой массы опасных веществ [21, 77], применяемый при оценках опасности объектов повышенной опасности, индексы опасности токсикологических воздействий [87, 93], пороговые значения выбросов вредных веществ в атмосферный воздух [77] и т.д.

В 1934 году энтомологом Честером Блиссом было предложено для учёта уничтоженных пестицидами вредителей использовать метод пробит-

анализа [125]. В области безопасности систем данный метод получил широкое распространение благодаря применению понятия комплексного показателя опасности, называемого пробитом. Данный показатель определяется эмпирически через параметры фактора опасности как [21, 26, 103, 125]:

$$\Pr ob_j = \alpha_{0j} + \alpha_{1j} \cdot \ln c + \alpha_{2j} \cdot \ln \tau, \qquad (3.34)$$

где c – количественный показатель опасности, например, концентрация вредного вещества; τ – время действия опасного фактора; j – некоторое опасное событие, например, гибель животных, возникновение хронических заболеваний, реализация негативного эффекта и т.д.

Использование комплексного показателя опасности в виде (3.34) связано с эмпирической закономерностью, характерной для действия многих опасностей (химических и радиационных поражений, воздействий взрывов, пожаров, последствий аварий, смертельного и общего травматизма и т.п.), при которых вероятность оцениваемого опасного события j подчиняется логарифмически-нормальному закону распределения, при этом риск опасного события выражается через пробит:

$$R_j\left(\Pr ob_j\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\Pr ob_j} exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt. \qquad (3.35)$$

В процессе обработки данных по значениям вероятности наблюдения опасного события, используя таблицы вероятности или вероятностные калькуляторы, определяют значение пробита согласно зависимости (3.35) и на графике на оси ординат откладывают это значение. В свою очередь, для данного опыта или наблюдения на оси абсцисс откладывают значение параметра или логарифма параметра показателя опасности в зависимости от вида распределения события – нормального или логарифмически-нормального. Подобная обработка данных в качестве примера представлена на рисунке 3.6.

Для опытных данных (по самым разным опасным событиям и воздействиям) методом пробит-анализа часто можно установить эмпирические закономерности, однако теоретическое обоснование этого факта пока отсутствует. Покажем, что результаты данной главы позволяют привести такое обоснование и ответить на вопрос, почему нелинейные

зависимости между вероятностями опасных событий и параметрами факторов опасности хорошо описываются пробит-зависимостями.

Для этой цели будем использовать зависимость (3.7) в виде связи энтропии состояния с вероятностью состояния системы вида $ds = dw/T$.

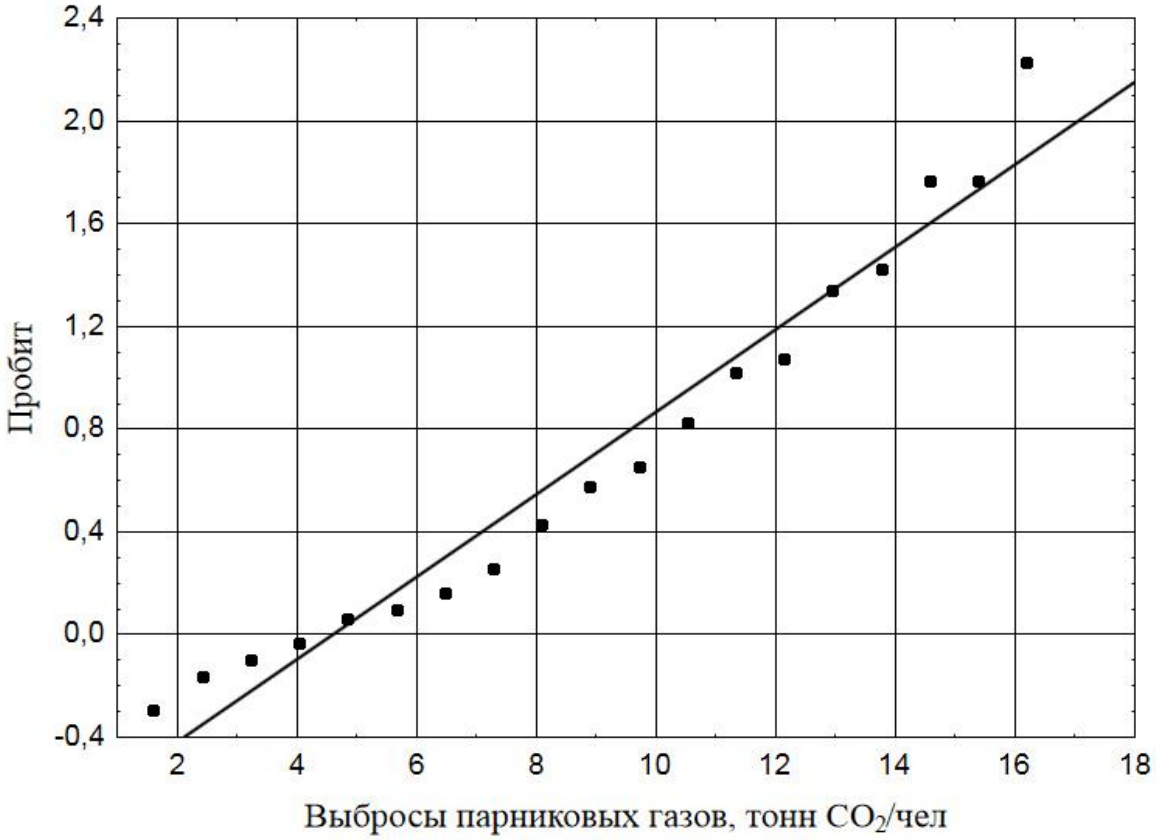

Рисунок 3.6. – График, отражающий результаты обработки данных методом пробит-анализа при оценке вероятности событий, связанных с выбросами парниковых газов в странах Европы

Уравнение для дифференциала вероятности сложного события совместного выполнения событий j_1 и j_2 согласно (3.33) будет иметь вид:

$$dw = W_1(p_1, p_2)dp_1 + W_2(p_1, p_2)dp_2, \qquad (3.36)$$

причем события j_1 и j_2 наблюдения показателей p_1 и p_2 могут быть как зависимые, так и независимые. В свою очередь, риск некоторого сложного опасного события, которое может иметь причинно-следственные связи с совместным событием наблюдения показателей p_1 и p_2, будет равен:

$$dR = R_1(p_1, p_2)dp_1 + R_2(p_1, p_2)dp_2. \qquad (3.37)$$

Также, как и ранее, предположим, что вероятности сложных событий могут быть изучены в одном многомерном вероятностном пространстве. В этом случае, для приведенного выше уравнения (3.36) комплексный индекс T представляет собой интегрирующий делитель для величины dw, при этом энтропия $s_w(p_1, p_2)$ является интегралом уравнения (3.36). В свою очередь, так как величины вероятностей R и w связаны между собой, то:

$$dR = \left(\frac{\partial R}{\partial w}\right)_1 \left(\frac{\partial w}{\partial T}\right)_1 \left(\frac{\partial T}{\partial p_1}\right) dp_1 + \left(\frac{\partial R}{\partial w}\right)_2 \left(\frac{\partial w}{\partial T}\right)_2 \left(\frac{\partial T}{\partial p_2}\right) dp_2 . \qquad (3.38)$$

$$dR = c_{1R} \cdot c_{w1} \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial p_1}\right) dp_1 + c_{2R} \cdot c_{w2} \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial p_2}\right) dp_2 . \qquad (3.39)$$

Можно показать, что комплексный индекс T также представляет собой интегрирующий делитель для величины dR, при этом энтропия $s_R(p_1, p_2)$ является интегралом уравнения (3.39).

Известно, что интегралов уравнений (3.36) и (3.39) бесчисленное множество, причем, если известен интегрирующий множитель уравнения $\chi_1 = 1/T$, то любой интегрирующий множитель будет равен: $\chi = (1/T) \cdot \omega(s)$, где $\omega(s)$ – произвольная дифференцируемая функция, а s – общий интеграл этого уравнения. При известном интегрирующем множителе любой интеграл для уравнений (3.36) и (3.39) будет равен: $P = \psi(s)$, где $d\psi/ds = \omega(s)$.

Теперь применим сформулированные результаты для развития теории оценки риска. Так как риск очень многих опасных событий может быть представлен уравнением (3.35), то $dR = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{\Pr ob^2}{2}\right) \cdot d\Pr ob$, откуда $d\Pr ob = \sqrt{2\pi} \cdot \frac{dR}{\exp\left(-\frac{\Pr ob^2}{2}\right)}$.

Таким образом, если в качестве интегрирующего множителя для величины dR использовать функцию энтропии вида $\chi = \frac{\sqrt{2\pi}}{T} \cdot \exp\left(-\frac{s^2}{2}\right)$, то пробит $\Pr ob$ в новом виде будет являться интегралом уравнения (3.37).

В этом случае можно искать связи между общими интегралами уравнений (3.36) и (3.37) вида:

$$\Pr ob = F(s). \qquad (3.40)$$

Опыт применения метода пробит-анализа при обработке опытных данных о вероятностях опасных событий указывает на то, что очень часто существуют уравнения вида (3.40), отличающиеся линейными зависимостями между величинами пробита и энтропии. Также следует отметить, что данный подход позволяет использовать при обработке данных не только обратную пробит-функцию нормального распределения, но и всякую обратную функцию эмпирического распределения вероятностей, полученную при обработке опытных данных, характеризующих изучаемый вид систем.

Все сказанное выше позволяет предложить следующий метод обработки опытных данных по вероятностям опасных событий. Вначале устанавливается эмпирическое распределение вероятности некоторого сложного события. Используя обратную функцию установленного эмпирического распределения, вероятности этих событий пересчитываются в модифицированные пробит-величины $(\Pr ob)$. Далее определяются составляющие функции энтропии в виде логарифмических зависимостей относительно безразмерных атрибутивных показателей $(\rho_k = p_k / p_{k_0})$. Методом множественной регрессии находятся зависимости между пробит-величинами и величинами ρ_k вида:

$$\Pr ob = c_0 + c_1 \cdot \ln \rho_1 + \ldots + c_n \cdot \ln \rho_n, \qquad (3.41)$$

где c_k – константы, ρ_k – безразмерные показатели состояния системы.

На основе полученных зависимостей определяются феноменологические величины c_k, характеризующие среднестатистические тенденции в развитии состояний изучаемой системы, после чего рассчитывается энтропия и потенциал состояния системы вида (3.21) – (3.27). Далее на основе полученных данных осуществляется комплексная оценка развития системы и выполняется многопараметрическое ранжирование объектов.

Предложенный метод отличается новизной и может быть апробирован по отношению к опытным данным для различных видов природно-антропогенных систем.

Глава четвертая

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА В ГОРОДАХ И НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТАХ

4.1. Существующие подходы к оценке опасности загрязнения атмосферного воздуха

Системный подход в области охраны окружающей среды начал использоваться с начала 70-ых годов. Приблизительно в это же время широко стал применяться термин «мониторинг», под которым понимали систему наблюдений, позволяющую оценить изменения в состоянии биосферы под влиянием человеческой деятельности. Наблюдения за состоянием окружающей среды и биологическими организмами и системный подход к анализу проблем охраны природы свойственны всем современным экологическим исследованиям. При этом следует отметить, что изучение загрязнения атмосферного воздуха занимает в этих исследованиях особое место, так как является основным фактором воздействия на человека и биосферу. В данной области сформировались различные подходы к оценке опасности загрязнения воздуха, которые во многих аспектах пересекаются. Существующие подходы привели к формированию целых научных и практических направлений, непосредственно связанных с экологическим и социально-гигиеническим мониторингом.

Экологический мониторинг как государственная система наблюдения, анализа, оценки и прогнозирования состояния окружающей природной среды является, с одной стороны, основой для обоснования управленческих решений, а с другой – системой, представляющей сведения о реальных параметрах и характеристиках окружающей среды [94, 111]. Опасность загрязнения природной среды оценивается на основе сравнения концентраций химических веществ, определенных при экологическом мониторинге, с безопасными уровнями, характеризующими различные виды воздействий на объекты.

Социально-гигиенический мониторинг направлен на установление, предупреждение, устранение или уменьшение факторов и условий

вредного влияния среды обитания на здоровье человека в целях обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия населения [79, 81, 82, 87, 93, 148, 150]. Риск для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду, оценивается на основе определения значений вероятности развития и степени выраженности неблагоприятных последствий для здоровья нынешних и будущих поколений.

Целью данной главы является системный анализ основных положений, принципов, подходов и методов оценки опасности при загрязнении атмосферного воздуха химическими веществами, а также разработка новых методов комплексной оценки загрязнения атмосферы и оценки риска негативных воздействий. Процедуры оценки опасности и риска при загрязнении атмосферного воздуха имеют большое значение, так как позволяют предупредить увеличение заболеваемости населения в крупных промышленных городах, сохранить биологические ресурсы промышленных регионов и предотвратить деградацию природных экосистем.

Анализ имеющейся литературы и исследований в области охраны атмосферы [34, 59, 111, 113] позволяет выделить два основных концептуальных подхода при оценке опасности:

- оценка опасности загрязнения атмосферного воздуха по данным экологического мониторинга;
- оценка опасности загрязнения атмосферного воздуха по данным проявлений токсических процессов у биологических объектов.

В основе первого концептуального подхода лежит оценка опасности событий, связанных с загрязнением атмосферного воздуха, исходя из применения существующих гигиенических и санитарных норм [94, 95, 111]. Второй концептуальный подход основан на оценке опасности событий, связанных с возникновением негативных эффектов у биологических объектов при загрязнении воздуха [26, 70, 81, 85, 87, 102, 103, 125, 136, 148, 150]. Сравнивая данные подходы, отметим, что граница разделения между ними относительно условна. Многие результаты, полученные в токсикологических и эпидемиологических исследованиях, используются при экологическом мониторинге и оценке опасности уровня загрязнения атмосферного воздуха. В свою очередь, данные о распространении

атмосферных загрязнителей широко используются при оценке рисков токсикологических воздействий и анализе последствий токсических процессов у биологических объектов. Однако основное отличие заключается в том, что в первом случае преобладают физико-химические и экологические методы, а также естественнонаучные методы анализа опасности и риска, которые применяются по отношению к основному объекту исследования – атмосферному воздуху, процессам изменения его состояния и связанными с этими процессами опасными событиями. Биологическая оценка уровня негативных воздействий вводится при данном подходе в методологию и практику через систему санитарно-гигиенического нормирования. Во втором случае применяются эпидемиологические, медицинские, биологические и токсикологические исследования, а также методы анализа опасности и риска по отношению к объекту исследования, в качестве которого выступают биоорганизмы.

В основе обоих подходов лежат общие базовые понятия, в которых под опасностью обычно понимают совокупность постоянно действующих и случайно возникающих факторов в результате некоторого инициирующего события или формирования условий окружающей среды, оказывающих негативное воздействие на реципиентов. Используются также общие определения в области опасности и риска, которые были приведены в предыдущей главе.

Важным в данной области является также понятие вредного вещества (примеси), т.е. вещества, которое при контакте с биологическим организмом может вызвать заболевания или другие неблагоприятные последствия в его состоянии. Применительно к вредному веществу используют также следующие основные понятия.

Токсичность – способность вещества при его воздействии на биологический организм вызывать негативные последствия различной степени тяжести (токсические эффекты, заболевания, повреждения, гибель).

Неблагоприятный (вредный) эффект – изменения в морфологии, физиологии, росте, развитии или продолжительности жизни организма, популяции или экологической системы, проявляющиеся в ухудшении функциональной способности или способности компенсировать

дополнительный стресс, или в увеличении чувствительности к другим воздействиям факторов окружающей среды.

Зависимость «доза-эффект» – связь между дозой/концентрацией и степенью выраженности эффекта в экспонированной популяции.

Порог вредного действия – минимальная концентрация или доза вещества, при воздействии которой в организме возникают изменения, выходящие за пределы физиологических приспособительных реакций, или скрытая (временно компенсированная) патология.

Предельно допустимая концентрация – содержание вредного вещества в окружающей среде на уровне границы безопасного воздействия, превышение которой может нанести непоправимый ущерб и вред реципиентам, а также качеству окружающей их среды.

В целом обоим подходам свойственны общий и специфический понятийно-категорийный аппарат, общепринятая научная и практическая методология, спектр методов и методик исследования, свой определенный перечень нормативных актов и нормативно-методических документов, принятие определенных сложившихся систем управления качеством окружающей среды и т.д.

Рассмотрим более подробно указанные выше два подхода к оценке опасности загрязнения воздуха.

4.2 Оценка опасности загрязнения атмосферного воздуха по данным экологического мониторинга

Данный подход к оценке опасности основан на определении перечня приоритетных и специфических веществ, контроле их содержания в воздухе населенных мест, использовании санитарно-гигиенических норм, оценке опасности загрязнения воздуха по различным характеристикам и параметрам изменения состояния загрязнения воздуха. Ведется также мониторинг опасных событий, связанных с загрязнением атмосферы. Конечным результатом данного подхода является комплексная оценка загрязнения атмосферы и получение исходных данных для разработки мероприятий по охране атмосферного воздуха.

Обычно государственные и ведомственные программы мониторинга качества атмосферного воздуха включают обязательный контроль приоритетных загрязняющих веществ на стационарных и передвижных постах. Например, в Украине в этот перечень входят пыль в виде взвешенных частиц, диоксид и монооксид азота, диоксид серы и оксид углерода. Среди специфических веществ осуществляется обязательный контроль формальдегида, бенз(а)пирена, тяжелых металлов. В России к этому списку приоритетных веществ добавляются также взвешенные вещества с размером частиц 10 мкм и менее (PM_{10}[1] ($ТЧ_{10}$)) и 2,5 мкм и менее ($PM_{2,5}$ ($ТЧ_{2,5}$)), озон, а также углеводороды. В соответствии с местными особенностями населенных пунктов на стационарных постах ведется также наблюдение за специфическими загрязнителями (например, аммиаком, бензолом, фенолом, сероводородом, фтористым водоводом, толуолом и др.). Контроль качества воздуха проводится в соответствии с утвержденным перечнем вредных веществ, принятым для каждого города в отдельности.

В США в число индикаторных веществ (criteria pollutants), загрязняющих атмосферный воздух, включены озон, монооксид углерода, диоксид азота, диоксид серы, взвешенные вещества и свинец. В свою очередь, в качестве приоритетных загрязнителей воздуха ВОЗ рекомендует контролировать взвешенные (твердые) вещества, диоксид азота, диоксид серы, озон и другие фотохимические оксиданты.

Считается, что наиболее опасными загрязнителями воздуха являются тяжелые металлы. Приоритетными для химико-токсикологического анализа среди них являются: свинец (Pb), ртуть (Hg), никель (Ni), кадмий (Cd), цинк (Zn), кобальт (Co), медь (Cu), обладающие высокой токсичностью и миграционной способностью. В США в число наиболее опасных веществ включены также асбест, бериллий и винилхлорид.

Полученные фактические данные наблюдений по концентрациям веществ сравниваются с нормативами качества атмосферного воздуха. В области охраны атмосферы нормативы устанавливаются различными документами государственного уровня, например [31, 32, 44, 85, 94, 95, 130]. Стандарты качества воздуха, принятые в различных странах по отношению к человеку, приведены в таблице 4.1 [31, 32, 44, 86, 94, 95, 111, 130].

[1] PM – взвешенные твердые частицы (от англ. particulate matter – «твёрдые вещества»)

Таблица 4.1. – Стандарты качества воздуха в разных странах мира

Загрязнитель	Вид нормативного значения за установленный период времени	Численное значение для страны, мг/м^3									Рекомендации ВОЗ, мг/м^3
		Армения	Азербайджан	Белоруссия	Грузия	Молдова	Россия	Украина	ЕС	США	
Диоксид серы (SO_2)	max за 20 мин.	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,35**	–	0,5$^{/}$
	среднее за 24 ч.	0,05	0,05	0,2	0,05	0,05	0,05	0,05	0,125	0,365	0,125
	среднегодовое	–	–	0,05	0,02	–	–	–	0,05	0,087	0,02
Диоксид азота (NO_2)	max за 20 мин.	0,085	0,085	0,25	0,20	0,085	0,20	0,20	0,20**	–	0,20**
	среднее за 24 ч.	0,04	0,04	0,10	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	–	0,04
	среднегодовое	–	–	0,04	–	–	–	–	0,04	0,1	0,04
Твердые частицы, $ТЧ_{10}$	max за 20 мин.	–	–	0,15	–	–	0,30	–	–	–	–
	среднее за 24 ч.	–	–	0,05	–	0,05	0,06	–	0,05	0,15	0,05
	среднегодовое	–	–	0,04	–	–	–	–	0,04	0,08	0,02
Твердые частицы, $ТЧ_{2,5}$	max за 20 мин.	–	–	0,065	–	–	0,16	–	–	–	–
	среднее за 24 ч.	–	–	0,025	–	–	0,035	–	–	0,035	0,025
	среднегодовое	–	–	0,015	–	–	0,025	–	0,025	0,015	0,01
Пыль (суммарные взвешенные частицы)	max за 20 мин.	0,5	0,3	0,3	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	–	–
	среднее за 24 ч.	0,15	0,10	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	–	–
	среднегодовое	–	–	0,10	–	–	–	–	–	–	–
Свинец (Pb)	max за 20 мин.	–	0,001	0,001	0,001	–	0,001	0,001	–	–	–
	среднее за 24 ч.	0,003	0,0003	0,0003	0,0003	–	0,0003	0,0003	–	–	–
	среднегодовое	–	–	0,0001	0,00006	–	–	–	0,0005	0,0015^{x}	0,0005
Оксид углерода (CO)	max за 20 мин.	5	5	5	5	5	5	5	10$^{//}$	10*	100^{xx}
	среднее за 24 ч.	3	3	3	3	3	3	3	–	40**	30**
	среднегодовое	–	–	0,5	–	–	–	–	–	–	10*
Бензол (C_6H_6)	max за 20 мин.	1,5	1,5	0,1	–	–	0,3	1,5	–	–	–
	среднее за 24 ч.	0,1	0,1	0,04	–	–	0,1	0,1	–	–	–
	среднегодовое	–	–	0,01	–	–	–	–	0,005	–	0,006
Озон (O_3)	среднее за 1 ч.	0,16	0,06	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,18	0,238	0,15–0,2
	среднее за 8 ч.	–	–	0,12	–	–	–	–	0,12$^{//}$	0,148	0,1
	среднее за 24 ч.	0,03	0,03	0,09	0,03	0,03	0,03	0,03	–	–	–
Мышьяк (As)	max за 20 мин.	–	–	0,008	–	–	–	–	–	–	–
	среднее за 24 ч.	0,003	–	0,003	–	–	0,0003	0,003	–	–	–
	среднегодовое	–	–	0,0008	–	–	–	–	$6\cdot10^{-6}$	–	$1,5\cdot10^{-6}$
Кадмий (Cd)	max за 20 мин.	–	–	0,003	–	–	–	–	–	–	–
	среднее за 24 ч.	0,0003	0,0003	0,001	–	–	0,0003	0,0003	–	–	–
	среднегодовое	–	–	0,0003	–	–	–	–	$5\cdot10^{-6}$	–	$5\cdot10^{-6}$
Никель (Ni)	max за 20 мин.	–	–	0,01	–	–	–	–	–	–	–
	среднее за 24 ч.	0,001	–	0,004	–	–	0,001	0,001	–	–	–
	среднегодовое	–	–	0,001	–	–	–	–	$2\cdot10^{-5}$	–	–
Бенз(а)пирен ($C_{20}H_{12}$)	max за 20 мин.	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	среднее за 24 ч.	10^{-6}	10^{-6}	$5\cdot10^{-6}$	–	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}	–	–	–
	среднегодовое	–	–	10^{-6}	–	–	–	–	10^{-6}	–	–

$^{/}$ – среднее за 10 мин.; ^{xx} – среднее за 15 мин.; ** – среднее за 1 час; * – среднее за 8 часов; ^{x} – среднее за 3 месяца; $^{//}$ – максимальная концентрация в течении суток, рассчитанная по концентрациям, измеренным с 8-часовым осреднением; $^{\backslash}$ – время осреднения: единичный риск/продолжительность жизни; ВОЗ – Всемирная организация здравоохранения

Исторически сложилось, что система экологического и санитарно-гигиенического нормирования, определяющая качество атмосферного воздуха и регламентирующая воздействие на биологические организмы загрязняющих веществ, в основном ориентируется на несколько видов объектов – человека, животных, растения, деревья, а также биосферу в целом. При этом для предотвращения негативных последствий в процессе нормирования определяются безопасные уровни воздействия. Научно обоснованные безопасные уровни законодательно утверждаются в каждой стране, благодаря чему они переводятся в ранг национальных санитарно-гигиенических и экологических нормативов.

В странах бывшего СССР к гигиеническим нормативам допустимого содержания веществ в атмосферном воздухе относятся: предельно допустимые концентрации (*ПДК*), ориентировочно-безопасные уровни воздействия (*ОБУВ*) и различные комплексные показатели.

В России, Украине и в большинстве стран постсоветского пространства система *ПДК* загрязняющих веществ для оценки качества атмосферного воздуха является наиболее апробированной. Величины *ПДК* устанавливаются как для каждого вещества в отдельности, так и для совместного присутствия определенного сочетания вредных веществ в атмосферном воздухе [31, 32, 44, 85, 94, 111, 130]. Предельно допустимые концентрации веществ в атмосферном воздухе населенных мест регламентируются в виде среднесуточной и максимально разовой *ПДК*.

Среднесуточная предельно допустимая концентрация ($ПДК_{с.с.}$) – это концентрация вредного вещества в воздухе населенных мест, которая не должна оказывать на человека прямого или косвенного воздействия при неограниченно долгом (годы) вдыхании. Таким образом, данная концентрация рассчитана на все группы населения и на неопределенно долгий период воздействия и, следовательно, является самым жестким санитарно-гигиеническим нормативом, устанавливающим концентрацию вредного вещества в воздушной среде. Величина $ПДК_{с.с.}$ в настоящее время выступает в качестве порога нормы для оценки благополучия воздушной среды в селитебной зоне.

В свою очередь, максимально разовая предельно допустимая концентрация ($ПДК_{м.р.}$) – это концентрация вредного вещества в воздухе

населенных мест, которая при вдыхании в течение 20 – 30 минут не должна вызывать рефлекторных реакций в организме человека (ощущение запаха, изменение биоэлектрической активности головного мозга, световой чувствительности глаз и др.). Величина $ПДК_{м.р.}$ используется при установлении научно-технических нормативов – предельно допустимых выбросов загрязняющих веществ.

Важной характеристикой является также класс опасности вещества. Согласно ГОСТ 12.1.007-76 все вредные вещества по степени воздействия на организм человека подразделяются на четыре класса опасности: 1 – чрезвычайно опасные, 2 – высокоопасные, 3 – умеренно опасные, 4 класс – малоопасные.

В настоящее время в России разработаны и утверждены предельно допустимые концентрации в атмосферном воздухе населенных мест для 614 вредных веществ, а для более чем 1500 веществ приняты ориентировочно безопасные уровни воздействия (*ОБУВ*). В Белоруссии установлены нормативы *ПДК* загрязняющих веществ в атмосферном воздухе для 570 веществ и *ОБУВ* загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных пунктов и мест массового отдыха населения для 1 500 веществ. В свою очередь, в Украине зарегламентированы нормативы *ПДК* для 509 веществ и *ОБУВ* для 1326 веществ.

Следует различать понятия *ПДК* (предельно допустимые концентрации) и предельные концентрации (целевые нормативы качества или предельные показатели). В Европейском союзе нормирование качества атмосферного воздуха осуществляется путем установления именно стандартов качества, основанных на предельных величинах или целевых показателях. В США установлены и приняты к использованию первичные и вторичные стандарты качества атмосферного воздуха. Первичными называются стандарты качества атмосферного воздуха, установленные и подлежащие соблюдению с целью охраны здоровья населения, включая чувствительные группы (к таковым отнесены, например, люди, страдающие астмой, дети, престарелые люди). Вторичными называются стандарты, установленные с целью защиты имущества людей, включая сокращение видимости, ущерб животным, урожаю, растениям и зданиям. Предельные

концентрации, также, как и *ПДК*, могут быть использованы как пороговые уровни для оценки существования опасных состояний загрязнения воздуха.

Допустимые нормы или правила, которые постепенно стали широко применяться как в США, так и в большинстве других стран, – это нормы, ежегодно издаваемые Американской конференцией гигиенистов государственной промышленности (American Conference of Governmental Industrial Hygienists – ACGIH), в ряде случаев они называются предельно допустимыми концентрациями (*ПДК*, англ. – *TLVs* (threshold limit value – величина порогового предела)) (LaNier 1984; Cook 1986; ACGIH 1994), [102].

В настоящее время в зарубежных странах (США, Канада) и международных организациях (ВОЗ, ФАО/ВОЗ, Комиссия европейского сообщества, Организация по экономическому сотрудничеству и развитию и др.) для человека разработаны референтные уровни воздействия для почти 1000 химических соединений. Причем около 20 % референтных концентраций обоснованы с использованием клинических и эпидемиологических данных. Для химических веществ, загрязняющих атмосферный воздух населенных мест, референтные концентрации дифференцированы в зависимости от продолжительности воздействия (от 5 минут до 24 часов) и степени тяжести возможных изменений состояния здоровья чувствительных подгрупп.

Важным биологическим объектом, для которого осуществляется нормирование качества воздуха является растительность и биосфера. В большинстве случаев растительность более чувствительна к вредным газам, чем человек [85, 136].

Основой для определения потенциального вредного воздействия загрязнения атмосферы на растительность и экосистемы является безопасный уровень, который представляет собой физические показатели загрязнения воздуха, ниже которых, в соответствии с нынешним уровнем знаний, не наблюдается значительного отрицательного воздействия на эти объекты. В таблицах 4.2 и 4.3 представлены показатели опасности и нормативы безопасных уровней воздействия загрязнителей воздуха на растения, принятые в постсоветских странах [85] и странах ЕС [111, 136].

Таблица 4.2. – Безопасные уровни загрязнения атмосферного воздуха при негативных воздействиях на растительность, биосферу и деревья, принятые в постсоветских странах

Название вещества (химическая формула)	Предельно допустимые концентрации (*ПДК*$_{био}$, мг/м^3) по критерию вредного воздействия					
	Биосфера		Растительность		Деревья	
	средне-суточ-ные	макси-мально-разовые	средне-суточ-ные	макси-мально-разовые	средне-суточ-ные	макси-мально-разовые
Фтор (F)	0,003	0,020	–	–	0,003	0,020
Формальдегид (HCOH)	0,003	0,020	–	0,020	0,003	0,020
Диоксид серы (SO_2)	0,015	0,020	–	0,020	0,015	0,300
Хлор (Cl_2)	0,015	0,025	–	0,025	0,015	0,025
Диоксид азота (NO_2)	0,020	0,040	0,020	–	0,040	0,040
Аммиак (NH_3)	0,040	0,050	–	0,050	0,040	0,100
Сероводород (H_2S)	0,080	0,080	–	0,080	0,080	0,080
Серная кислота (H_2SO_4)	0,030	0,100	–	0,100	0,030	0,100
Бензол (C_6H_6)	0,050	0,100	–	0,100	0,050	0,100
Озон (O_3)	–	0,100	–	0,100	–	–
Пыль	0,050	0,200	0,050	0,200	0,050	0,200
Оксид углерода (CO)	1,000	1,000	–	3,000	1,000	3,000

Таблица 4.3. – Нормативы ЕС по негативным воздействиям на растения при загрязнении атмосферного воздуха

Объект воздействия	Годовая и зимняя средняя величина диоксида серы, мкг/м^3	Среднегодовая величина оксидов азота ($NO + NO_2$), мкг/м^3	Средняя за 20 дней за календарный год величина озона, мкг/м^3·ч
Посевы	30	–	–
Леса/растения	20	–	–
Чувствительные леса/растения	15	–	–
Лишайники	10	–	–
Большинство видов растений	–	30	17 000

Таким образом, в области оценки опасности при загрязнении атмосферного воздуха существуют различные пороговые уровни, по отношению к которым можно оценивать существование опасных состояний природно-антропогенных систем. В зависимости от того, какова цель оценки опасности, в качестве пороговых уровней могут применяться предельные концентрации, безопасные уровни (*ПДК*, *RfC*) или даже фоновые значения концентраций (например, при ретроспективном анализе данных мониторинга).

Кроме концентраций и времени действия важным при оценке опасности загрязнителей воздуха является полная характеристика химического вещества, которая включает в себя химический класс вещества, знания о строении и особенностях молекул вещества, его физико-химических свойствах, общепринятых показателях опасности и т.д.

Общая оценка опасности проводится по характеристикам и параметрам изменения состояния загрязнения атмосферного воздуха, по статистическим оценкам опасных событий, связанным с превышением показателей загрязнения выше санитарных норм, по интегральным показателям и комплексным характеристикам опасности смесей веществ, которые присутствуют в атмосферном воздухе и т.д.

Основные выборочные характеристики, простейшие описательные статистики и методы статистического анализа данных при мониторинге атмосферного воздуха определены нормативно-методическим документом [94].

Для систематизации и оценки уровня загрязнения атмосферы за рассматриваемый период обычно применяются различные статистические характеристики, например, среднее арифметическое значение концентрации примеси; среднее квадратическое отклонение измерений от среднего арифметического значения; максимальное значение концентрации примеси; коэффициент вариации, показывающий долю изменчивости от среднего арифметического значения, а также другие статистические величины.

Кроме статистических характеристик в разных странах мира существует также множество интегральных и комплексных показателей загрязнения атмосферного воздуха, о которых говорилось в первой главе: комплексный индекс загрязнения атмосферы *КИЗА*, показатель

загрязнения *ПЗ*, предельно допустимое загрязнение *ПЗА*, суммарный показатель загрязнения атмосферного воздуха *P*, индекс качества атмосферного воздуха *AQI* (Air Quality Index), *AQHI* (Air Quality Health Index), общий индекс качества воздуха *CAQI* (Common Air Quality Index), индексы *ATMO*, *BELATMO*, *API*, *Z*, *Q*, *HI*, *H* и т.д. [34 44, 59, 78, 93, 94, 113].

Как видно из приведенного материала, анализируемый в данном подразделе подход к оценке опасности ориентирован в основном на использование общепринятых санитарно-гигиенических норм (на приоритетности защиты человека и возможности использования нормативов качества воздуха), а также на обязательном контроле приоритетных веществ и выборочном перечне специфических загрязнителей атмосферы. Все комплексные индексы представляют собой средневзвешенные количественные оценки опасности, основанные на применении тех или иных видов экспертных зависимостей. Причем данные зависимости определяют опасность нескольких воздействующих веществ, исходя из уровня загрязнения воздуха по отношению к действующим нормам.

Существующий подход к оценке опасности загрязнения атмосферного воздуха по данным экологического мониторинга представлен в таблице 4.4. В таблице приведен перечень веществ, загрязняющих атмосферный воздух, перечислены их характеристики и свойства, а также дана существующая классификация опасности загрязнения воздуха, применяемая в настоящее время субъектами экологического мониторинга при оценке и анализе уровня загрязнения атмосферы, а также ранжировании городов по показателям опасности.

Следует отметить, что данный подход не определяет опасность воздействия на биологические объекты, исходя из непосредственно нанесенного вреда, а дает сравнительную оценку по отношению к заданным нормируемым значениям показателей, средним или фоновым уровням загрязнения. В каждой стране исторически данный подход представляет собой первый и очень важный этап при создании и совершенствовании систем управления качеством атмосферного воздуха.

Таблица 4.4. – Система оценки опасности при загрязнении атмосферного воздуха химическими веществами по данным мониторинга загрязнения атмосферного воздуха

Загрязняющие вещества	Характеристика и свойства загрязняющих веществ	Оценка опасности загрязнения воздуха
1) приоритетные (основные, критериальные, обязательные, индикаторные): взвешенные твердые частицы (пыль), диоксид серы (SO_2), оксид углерода (CO), диоксид (NO_2) и монооксид (NO) азота; 2) специфические: фенол, аммиак, формальдегид, сероводород, бенз(а)пирен, тяжелые металлы (Pb, Hg, Cd, Cu, Zn, Fe, Mn, Ni, Cr), сажа, озон и другие фотохимические окислители, кислоты (H_2SO_4, HF, HCl, HNO_3 и др.), углеводороды, например, бензол и его производные (толуол, этилбензол, ксилол, анилин) и другие ЛОС, а также СОЗ (фураны, диоксины, хлорорганические пестициды, инсектициды – всего 24 наименования).	1) химический класс; 2) строение и особенности пространственной организации молекул вещества; 3) физико-химические свойства вещества (молекулярная масса, агрегатное состояние, упругость пара, летучесть, растворимость, реакционная способность, стабильность, трансформация в атмосферном воздухе, фактор биоконцентрирования или биоаккумуляции, период полусуществования вещества, коэффициент диффузии); 4) показатели опасности вещества (касс токсичности (опасности), степень вредности); 5) концентрация и время нахождения загрязняющего вещества в атмосферном воздухе.	1) по приоритетности веществ, повсеместности и постоянству их присутствия; 2) по характеристикам и параметрам изменения состояния загрязнения воздуха: – по уровню концентрации за установленный период времени по сравнению с нормами; – по статистическим характеристикам наблюдаемых величин (среднее, среднеквадратическое отклонение, коэффициент вариации, максимальное) за год, за отдельные месяцы, за ряд лет (чаще всего 5); – по максимальным и средним наблюдаемым концентрациям в мг/м^3 (%, ppm, ppb), в долях *ПДК/TLV*; – по фоновым и приземным максимальным концентрациям примеси; – по тенденциям *уровня* загрязнения с учетом ретроспективных данных; – по комплексу показателей для приоритетных / наиболее опасных веществ (индексы *ИЗА*, *КИЗА*, *ПДЗ*, *ПЗ*, *ПЗА*, *P*, *Z*, *СИ*, *q*, *Q*, *HI*, *H*, *AQI*, *AQHI*, *BELATMO*, *CAQI*, *API*, *MAPI*); 3) по опасным событиям / по вероятности наблюдаемых опасных событий: – по числу случаев превышения (за год, за месяц, по постам, по городу) разовыми (восьмичасовыми, среднесуточными, среднегодовыми) концентрациями: а) установленных норм (*ПДК/TLV*); б) заданных уровней (5*ПДК*, 10*ПДК*); – по повторяемости (наибольшей) концентраций в воздухе (% случаев за год, за месяц) выше: а) установленных норм (*ПДК*); б) заданных уровней (5*ПДК*, 10*ПДК*); – по кратности превышения (% случаев) показателей загрязнения (*ПЗ*) нормативных значений относительных интегральных критериев (*ПДЗ*); 4) по комплексным характеристикам опасности смесей химических веществ с учетом изменения эффекта биологического действия при совместном воздействии двух и более веществ одновременно (аддитивное, синергетическое, антагонистическое действия).

4.3 Оценка опасности загрязнения атмосферного воздуха по данным проявления токсических процессов у биологических объектов

Наряду с описанным выше подходом оценки опасности в практике применяются методы, основанные на оценке рисков воздействий загрязнителей атмосферы на биологические объекты. В некоторых странах существуют системы управления в области охраны атмосферного воздуха, которые связаны с изучением рисков токсического действия вредных веществ и заболеваемости населения.

Данный метод оценки опасности при воздействии на биологические объекты основан на изучении проявлений токсических процессов. Токсичность проявляется и может быть изучена в процессе воздействия на органы, организмы, группы организмов, популяции и т.д. В качестве объектов воздействия обычно рассматривается человек, животные, растения и биосфера. В настоящее время методики определения безопасных уровней воздействий (*ПДК*, *RfC*) построены на основе проведения токсикологических экспериментов на животных и иногда на людях [26, 70, 79, 81, 83, 93, 102]. Для основных биологических объектов виды воздействий и принятые критерии для оценки риска обобщены в таблице 4.5.

Оценка опасности негативного воздействия веществ связана с изучением характеристик и параметров токсического процесса на основе зависимостей «доза-эффект». Каждое вещество может отличаться широким спектром проявлений токсического процесса, особенностями воздействия на объекты и спецификой действия, основным видом токсического действия (общетоксическое, раздражающее, канцерогенное, аллергенное, мутагенное и т.д.), количественными показателями зависимости «доза-эффект» и т.д.

Оценка зависимости «доза-эффект» осуществляется чаще всего путем проведения экспериментов на животных [26, 102]. Такие эксперименты направлены на установление количественных характеристик и параметров этой зависимости, которая представляет собой связь между дозой/концентрацией и степенью выраженности того или иного эффекта при токсическом воздействии.

Таблица 4.5. – Объекты негативного воздействия и критерии оценки опасности при загрязнении атмосферного воздуха

Объекты воздействия	Негативные эффекты	Виды воздействий	Количественные критерии и показатели для оценки опасности
человек	болезни органов дыхания, крови, заболеваемость сердечно-сосудистой и центральной нервной системы	хроническое	предельно допустимая среднесуточная концентрация вещества в атмосферном воздухе ($ПДК_{с.с.}$); максимально недействующая концентрация (*МНК*); референтная концентрация (*RfC*); пороговый уровень воздействия, при котором не наблюдается вредный эффект ($NOAEL_{ch}$).
		острое	референтный уровень острых ингаляционных воздействий на население (*ARfC*); пороговый уровень острого воздействия, при котором не наблюдается вредный эффект ($NOAEL_{ac}$).
	рефлекторные реакции	рефлекторное	предельно допустимая максимально разовая концентрация вещества в атмосферном воздухе ($ПДК_{м.р.}$); порог ощущения запаха вещества
	онкологические заболевания, новообразования	канцерогенное	единичный риск (*UR*) для оценки канцерогенного действия вредного вещества или фактор канцерогенного потенциала (SF_i) при ингаляционных воздействиях
животные	отклонения биологических показателей и характеристик состояния организма от нормы или уровня фона; заболеваемость органов дыхания, крови, заболеваемость сердечно-сосудистой и центральной нервной системы и т.д.	хроническое	порог хронического общетоксического действия (P_{ch}); пороговый уровень воздействия, при котором не наблюдается вредный эффект ($NOAEL_{ch}$)
		острое	пороговый уровень острого воздействия, при котором не наблюдается вредный эффект ($NOAEL_{ac}$)
растительность, деревья	скрытые и хронические повреждения, снижение устойчивости фитоценозов	хроническое	предельно допустимая среднесуточная концентрация вещества в атмосферном воздухе для растительности ($ПДК_{с.с.}$)
	острые повреждения и существенное снижение фиторазнообразия	острое	предельно допустимая максимально разовая концентрация вещества в атмосферном воздухе для растительности ($ПДК_{м.р.}$)
Биосфера	повреждение среды обитания и снижение устойчивости биосфе-ры	хроническое	предельно допустимая среднесуточная концентрация вещества в атмосферном воздухе для биосферы ($ПДК_{с.с.}$)
	значительные нарушения среды обитания и снижение биоразнообразия	острое	предельно допустимая максимально разовая концентрация вещества в атмосферном воздухе для биосферы ($ПДК_{м.р.}$)

Риск возникновения того или иного эффекта оценивают по частоте возникновения характерных опасных событий [26]. На основании опытных данных определяются параметры зависимости «доза-эффект», которая представляет собой логарифмически-нормальную кривую, где процент животных с положительной реакцией на воздействие является функцией концентрации и времени действия вещества. В общем виде такая зависимость в координатах «вероятность эффекта – логарифм концентрации» имеет вид *S*-образной кривой [26, 70, 125], как это показано на рисунке 4.1.

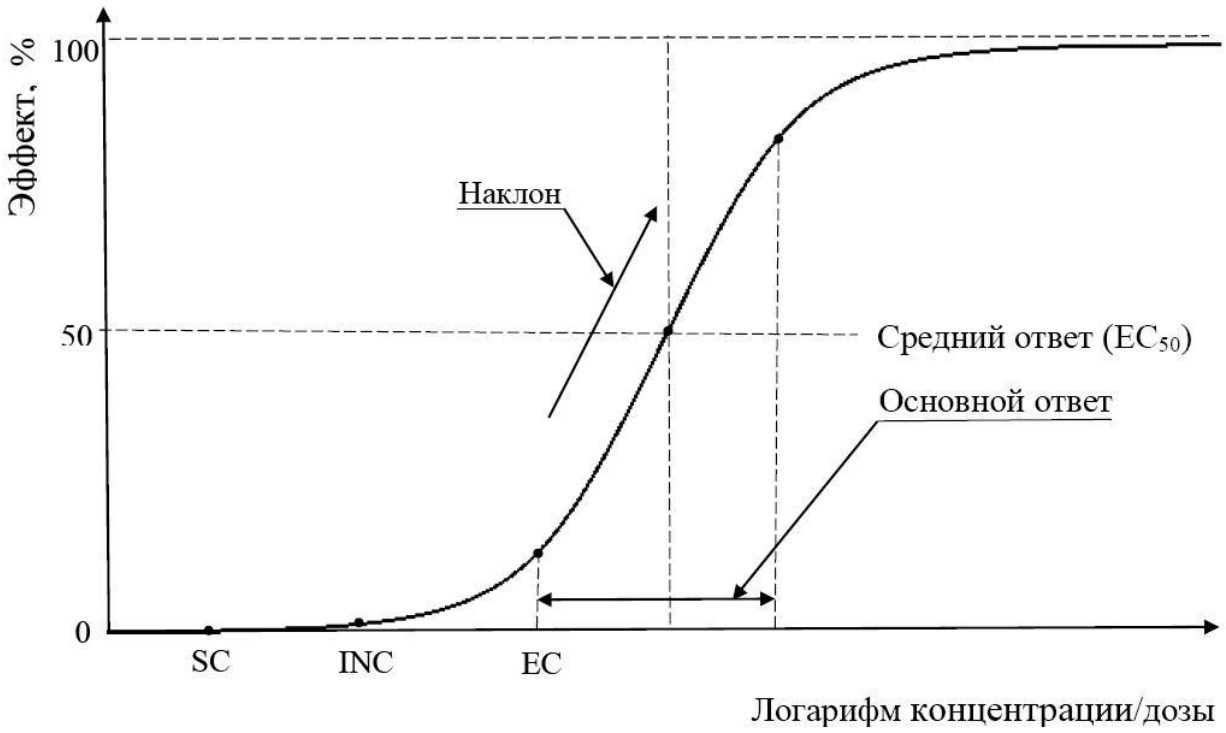

Рисунок 4.1. – Пример характерной зависимости «доза-эффект»:

SC – безопасный уровень/концентрация (safe concentration), например *RfC* или *ПДК*;
INC – уровень ненаблюдаемого эффекта (ineffective concentrations), например *NOEL* или максимально недействующая концентрация;
EC – эффективная концентрация (effective concentration), например EC_{10}

По интенсивности воздействия вероятностные зависимости «доза-эффект» определяются для различных видов воздействий (видов эффектов), при этом реакции на загрязнение воздуха могут иметь различные формы.

В зависимости от времени действия и концентрации вещества различают острое, подострое, хроническое воздействие [26]. По характеру воздействия на организм согласно ГОСТ 12.0.003-74 вещества подразделяются на общетоксические, раздражающие, сенсибилизирующие, мутагенные, канцерогенные и влияющие на репродуктивную функцию (ртуть, свинец, стирол). Таким образом, эффекты представляют собой различные сложные опасные события, которые характеризуют собой то или иное воздействие.

Параметры токсикометрии вредных веществ лежат в основе их классификации по степени опасности. Как указывалось выше, промышленные токсиканты в соответствии с ГОСТ 12.1.007-76 подразделяются на четыре класса опасности. В целом считается, что более опасны долговременные воздействия малых концентраций, чем кратковременные, но высокие значения концентраций веществ.

Самой сложной проблемой в токсикологии является проблема оценки порогов (или безопасных уровней) для всех видов воздействий вредных веществ как основы для гигиенического нормирования, особенно таких, как мутагенное, бластомогенное или сенсибилизирующее действие химических веществ. Также очень трудоемким процессом является установление для различных видов воздействий всех необходимых характеристик и параметров зависимости «доза-эффект» с учетом возможных диапазонов изменения концентрации вещества и времени его действия.

Таким образом, оценка опасности токсического действия загрязнителей атмосферного воздуха проводится по показателям, видам и характеристикам вредности химических веществ, по продолжительности и концентрациям действия веществ, по опасным событиям (эффектам), характеристикам и параметрам зависимости «доза-эффект». В целом существующий подход к оценке опасности загрязнения атмосферного воздуха по данным проявления токсического процесса представлен в таблице 4.6.

Таблица 4.6. – Система оценки опасности при загрязнении атмосферного воздуха химическими веществами по данным проявления токсического процесса у биологических объектов

Характер действия и формы проявления токсического процесса при воздействии	Характеристик и параметры токсического процесса	Оценка опасности токсического действия
1) на человека и животных: – болезни химической этиологии (интоксикации, отравления); – транзиторные токсические реакции (состояния, сопровождающиеся кратковременной утратой дееспособности – раздражение глаз, дыхательных путей); – аллобиоз (стойкие изменения реактивности организма на воздействие факторов среды, психические и физические нагрузки (аллергия, иммуносупрессия, повышенная утомляемость); – специальные токсические процессы (развиваются у части популяции в особых условиях – канцерогенез, эмбриотоксичность, нарушение репродуктивных функций). 2) на растительность: нарушение регуляторных функций биологических мембран, разрушение и подавление синтеза пигментов, инактивация важных ферментов из-за распада белков, подавление фотосинтеза, активация окислительных ферментов и дыхания, увеличение транспирации и изменение соотношения форм воды в клетке, что ведет к нарушению строения хлоропластов, к плазмолизу клетки, повреждению ассимиляционных органов, усилению старения, развитию видимых симптомов повреждения (хлорозы и некрозы) тканей листа.	– по пороговому и беспороговому принципу действия; – по времени (продолжительности) воздействия токсиканта на биообъект (острая, подострая, хроническая формы проявления токсического процесса); – по локализации патологического процесса (местный, общий, смешанный или избирательный характер действия); – по интенсивности воздействия токсиканта, определяющейся дозо-временными особенностями действия (тяжелая, средняя и легкая степень тяжести проявления токсического эффекта).	1) по показателям, видам и характеристикам вредности химических веществ: – по лимитирующему (определяющему) показателю вредности; – по специальным видам токсического действия (иммунотоксичность, мутагенез, канцерогенез, тератогенез и влияние на репродуктивную функцию), а также сенсибилизирующему действию; – по классам опасности/канцерогенности, факторам канцерогенного потенциала SF_i; – по показателям кумулятивности (коэффициент кумуляции $K_к=\Sigma ЛД_{50}/ЛД_{50}$, степень кумуляции $S=ЛД_{50}/\Sigma ЛД_{50}$, %); 2) по продолжительности и порогам вредного действия вещества: – по периодам времени (за ожидаемую продолжительность жизни человека – 70 лет, период усреднения для хронических воздействий для взрослых – 30 лет, для детей в возрасте до 6 лет – 6 лет, для условий кратковременного непрерывного воздействия продолжительностью экспозиции от 5 – 30 мин. до 6 – 8 или 24 часов), подостр-до 90 сут., 10 – 12 % средней продолжительности жизни, что составляет для человека 8 лет, для крыс и мышей – 13 недель; – по порогам: острого Lim_{ac} ($ПК_{остр.}$), острого избирательного (специфического) $Lim_{ac\ sp}$, подострого $Lim_{sub\ ac}$, хронического общетоксического $Lim_{ch\ int}$ ($ПК_{хр.}$), хронического специфического (отдаленных эффектов) $Lim_{ch\ sp}$, сенсибилизирующего Lim_{al}, раздражающего Lim_{ir} действий; ощущения неспецифического запаха Lim_{olf} и т.д. 3) по характеристикам и параметрам зависимости «доза-эффект»: – по концентрациям веществ, вызывающим заданный % неблагоприятных эффектов в группе биообъектов (смертность, заболеваемость) при определенной экспозиции (2 – 4 ч. – в остром эксперименте; 10 – 15 % времени жизни животного (для белых крыс – 3 мес.) – в хроническом эксперименте для выявления общетоксического действия; не менее трети продолжительности жизни (для экспериментальных животных (мыши, крысы) – 12 мес.) – в хроническом опыте для выявления канцерогенного действия и т.д.): CL_{100}, CL_{95}, CL_{50}, CL_{84}, CL_{16}, CL_5, CL_0); – по различным критериям оценки уровней неблагоприятных воздействий: а) по доверительным границам концентрации/дозы, рассчитанной с заданной вероятностью эффекта (например, порог обнаружения запаха); б) по концентрациям, не вызывающим/вызывающим неблагоприятные эффекты: *LOAEL*, *LOEL*, *NOAEL*, *NOEL*, *FEL*, *AEL*, *REL*, *WEEL*, *EAL*, *RfC*, *A RfC*, *A EGL* (уровни острого воздействия, США), *ADD* (пожизненная средняя суточная доза) *ПДК*/*TLV*, *ПДУ*/*PEL*, *OELs*, *OES*, *MAR*, *ADI*, *TDI*, *HA*, *PNEL*, *LARC*, *ADC*, *МНК*, *МДК*; – по комплексу показателей выражения эффективной токсичности (коэффициент опасности ингаляционного отравления (*КВИО*), коэффициент вариабельности смертельных концентраций CL_{84}/CL_{16}, функция $S=((CL_{84}/CL_{50})+(CL_{50}/CL_{16})/2$ угла наклона кривой смертельных концентраций к абсцисс, величина зоны острого ($Z_{ac}=CL_{50}/Lim_{ac}$), хронического ($Z_{ch}=Lim_{ac}/Lim_{ch}$) и биологического ($Z_{biol}=CL_{50}/Lim_{ch}$) действия и т.д.

Анализируемый выше подход к оценке опасности токсического воздействия на биологические объекты ориентирован на использование сравнительно полной информации о токсическом действии веществ на различные организмы в широком диапазоне изменения времени действия и концентрации загрязняющего вещества. Положительным фактом данного подхода является его информативность, связанная с использованием обширной информации о различных видах негативных воздействий на различных реципиентов. Недостатком подхода является пока что слабая изученность зависимостей «доза-эффект» и существенная неопределенность в данных для многих веществ по отношению к разным биологическим объектам. Сложность этой задачи связана с необходимостью изучения токсического действия широкого спектра веществ по отношению к человеку, животным и растениям, при самых разных временах и концентрациях действия веществ, а также при изучении различных форм проявлений токсического процесса и вызываемым ими негативных эффектов. Поэтому, полная характеристика зависимостей «доза-эффект» существует пока для ограниченного списка веществ.

Данный подход в своей сути использует вероятностную оценку опасности на основе определения рисков негативных эффектов в зависимости от времени и концентраций действия вещества, причем опасность воздействия на биологические объекты определяется исходя из непосредственно нанесенного вреда. Конечным результатом данного методологического подхода является полное представление об опасности загрязнения атмосферного воздуха для широкого перечня вредных веществ, и оценка рисков заболеваемости населения или возникновения других негативных эффектов при реализации опасных событий, связанных с загрязнением атмосферного воздуха. Это позволяет оценивать степень нанесенного вреда и разрабатывать мероприятия по охране здоровья населения, исходя из анализа рисков негативных эффектов и возможных последствий для здоровья человека.

Методы оценки опасности при загрязнении атмосферного воздуха по данным проявления токсического процесса у биологических объектов сегодня интенсивно развиваются.

4.4 Опасные события и их риски при загрязнении атмосферного воздуха

Анализ рисков предусматривает предупреждение опасных и негативных последствий действий опасности на объекты воздействия и обоснование управленческих решений по снижению уровня риска. Известно, что анализ риска состоит из трех взаимосвязанных процедур: оценки риска, управления риском и информирования о риске [77, 81, 87, 93, 144, 145, 148 – 150]. Данные процедуры рассматривают в качестве важных системообразующих элементов мониторинга окружающей среды и социально-гигиенического мониторинга.

Оценка риска проводится на основе событий, отражающих появление некоторых неблагоприятных или опасных состояний, эффектов или последствий. При загрязнении атмосферного воздуха такая оценка обычно осуществляется по двум параметрам фактора опасности – концентрации вредного вещества и времени его действия на биологический объект. Параметры фактора опасности рассматриваются как характеристические величины опасных событий, связанных с загрязнением атмосферного воздуха. При построении функций риска оценивают вероятности таких событий и устанавливают их связи с негативными последствиями: эффектами, заболеваемостью, смертностью, связанными с катастрофическим загрязнением воздуха, и т.д.).

В экологическом и социально-гигиеническом мониторинге подобные события могут быть систематизированы на основе общего подхода оценки рисков опасных событий следующим образом.

1. При загрязнении воздуха одним вредным веществом в момент наблюдения реализуется событие, связанное с определением концентрации вещества в атмосферном воздухе, как характеристической величины данного события. Наблюдения осуществляются на постах и все последовательности наблюдений представляются временными рядами событий, каждый из которых относится к определенному объекту – посту контроля загрязнения атмосферы. Все события являются несовместными.

Для случайной величины вероятность события, что в определенный момент времени наблюдаемая концентрация C вредного вещества меньше

некоторого заданного значения c, определяется из функции распределения $P(c) = P(C < c)$, которая находится по данным наблюдений. Эта функция распределения чаще всего подчиняется логарифмически-нормальному закону распределения.

На одном контрольном посту все наблюдаемые события (за год, месяц, сутки, с периодичностью 6 часов и т.д.) образуют полную группу. Для дискретных событий $\sum_{i=1}^{k} P_i = 1$, для непрерывных случайных величин $\int_0^\infty f(c)dc = 1$, где i – текущий номер наблюдения событий в разные моменты времени, k – количество наблюдений, а $f(c)$ – функция распределения случайной величины, причем $c \geq 0$.

Все события, связанные с загрязнением воздуха, могут быть оценены по фактору опасности, исходя из безопасной границы опасного процесса, путем определения коэффициента опасности:

$$HQ = c / I, \tag{4.1}$$

где I – порог (уровень) безопасного воздействия (хронического, острого и т.д.) при загрязнении атмосферного воздуха, заданный в тех же единицах, что и концентрация вещества; c – наблюдаемая концентрация вредного вещества. Это позволяет сортировать опасные события и провести их ранжирование по степени опасности. Такая оценка обычно производится для определенного вида негативного воздействия, на основе использования различных безопасных уровней (например, $ПДК_{с.с.}$, $ПДК_{м.р.}$, *RfC*, *ARfC* и т.д.). Вероятность таких событий может выступать в виде рисков нарушения качества атмосферного воздуха.

Если ведутся наблюдения одного вредного вещества на нескольких постах (например, на территории города), то все события также образуют полную группу или их вероятности могут быть нормируемы. Для дискретных событий $\sum_{i=1}^{m} P_i = 1$, для непрерывных случайных величин $\int_0^\infty f(c)dc = 1$, где i – номер контрольного поста наблюдения, c – среднегодовая (среднемесячная, среднесуточная) концентрация, m –

количество контрольных постов наблюдения, а $f(c)$ – функция распределения случайной величины, которая оценивается по данным для всех контрольных постов. Все события в указанном случае можно рассматривать как совместные, так как они привязываются к одному и тому же моменту времени – суткам, месяцам, годам.

Аналогичным образом могут быть оценены вероятности событий при загрязнении атмосферного воздуха в различных городах. В этом случае значения концентраций (например, среднегодовых, среднемесячных) относятся к объектам, в качестве которых выступают города или населенные пункты, где ведутся наблюдения. События наблюдений концентрации конкретного вещества в этом случае также можно считать совместными.

Вероятности указанных выше событий наблюдений концентрации одного вредного вещества (на одном посту, на группе постов, в группе городов) изучаются при решении задач экологического мониторинга загрязнения атмосферного воздуха.

2. При загрязнении воздуха несколькими вредными веществами на контрольном посту (в населенном пункте) реализуется совместное событие одновременного наблюдения суммарного загрязнения.

Для данного совместного события, в случае если все события независимы, вероятность сложного события равна произведению вероятностей более простых событий:

$$P_n(c) = P(c_1) \cdot P(c_2) \cdot \ldots \cdot P(c_n), \tag{4.2}$$

где $c_1,\ldots,c_n$ – концентрации различных вредных веществ.

Для зависимых событий вероятность сложного события будет равна

$$P_n(c) = P(c_1) \cdot P_{c_1}(c_2) \cdot \ldots \cdot P_{c_{n-1}}(c_n), \tag{4.3}$$

где условные вероятности $P_{c_{i-1}}(c_i)$ вычисляются в предположении, что все предыдущие события, связанные с загрязнением воздуха, произошли. Вероятности таких событий могут быть оценены по опытным данным путем определения распределений вероятности сложных и более простых событий и изучения взаимосвязей между ними.

Все подобные совместные события, связанные с загрязнением воздуха, могут быть оценены по фактору опасности, исходя из

классификации состояния загрязнения атмосферы, например, путем использования комплексных индексов (*КИЗА*, *ПЗА* и т.д.) и определения категорий опасности. Это позволяет классифицировать сложные совместные события и провести их ранжирование по степени опасности (норма, риск, кризис, бедствие). Такая оценка производится на основе использования безопасных уровней для каждого из контролируемых веществ и применения комплексных индексов. Вероятность таких событий также может выступать в виде рисков нарушения качества атмосферного воздуха по комплексу показателей. Вероятности указанных выше совместных событий изучаются при решении задач экологического мониторинга загрязнения атмосферного воздуха.

3. При загрязнении воздуха одним вредным веществом и наблюдении в воздухе некоторой опасной концентрации за определенный период времени может реализоваться сложное событие j возникновения негативного эффекта у биологического объекта (например, физиологическое отклонение, заболевание, смерть).

Экспериментально такая оценка проводится в группе особей по частоте событий j, которая превышает некоторое пороговое значение вероятности (например, 5 %), чтобы исключить спонтанные эффекты. Вероятность таких эффектов оценивается в опыте с двумя группами особей: группой, находящейся при опасных условиях загрязнения воздуха и с контрольной группой, которая находится при безопасных условиях окружающей среды.

Вероятность опасного события j определяется в виде функции риска для заданного вида воздействия (хронического, острого, рефлекторного, канцерогенного и т.д.)

$$R_j(c) = w_j(c) \cdot P(c), \tag{4.4}$$

где $w_j(c)$ – условная вероятность нанесения вреда человеку (биосистеме, объекту) в случае реализации опасности наступлении негативных событий j при загрязнении атмосферного воздуха вредным веществом с концентрацией величиной c; $P(c)$ – вероятность загрязнения воздуха вредным веществом с концентрацией величиной c.

В качестве условной вероятности может выступать экспериментально определенная зависимость «доза-эффект» для изучаемого вредного вещества и заданного вида негативного воздействия. Данное сложное событие j реализуется за определенный промежуток времени, т.к. эффект негативного воздействия наблюдается с некоторым запаздыванием после воздействия вредного вещества на биологический объект.

Вероятности сложных событий возникновения негативных эффектов изучаются преимущественно при решении задач социально-гигиенического мониторинга загрязнения атмосферного воздуха.

4. При загрязнении воздуха одним веществом и наблюдении в разные моменты времени в воздухе различных опасных концентраций этого вещества на посту (в населенном пункте) может реализоваться сложное событие j возникновения негативного эффекта у биообъекта. Вероятность такого опасного события j определяется в виде функции риска для определенного вида воздействия (хронического, острого, рефлекторного, канцерогенного и т.д.):

$$R_j(c) = \sum_{i=1}^{k} w_j(c_i) \cdot P(c_i), \tag{4.5}$$

где $w_j(c_i)$ – условная вероятность нанесения вреда человеку (биосистеме, объекту) в случае реализации опасности наступлении негативных событий j при загрязнении атмосферного воздуха вредным веществом с концентрацией величиной c_i; $P(c_i)$ – вероятность загрязнения воздуха вредным веществом с концентрацией величиной c_i, i – текущий номер наблюдения событий в разные моменты времени, k – количество наблюдений. При этом события загрязнения воздуха образуют полную группу несовместных событий, т.е. $\sum_{i=1}^{k} P(c_i) = 1$.

В данном случае в качестве условных вероятностей $w_j(c_i)$ также может выступать зависимость «доза-эффект» для изучаемого вредного вещества и заданного вида негативного воздействия. Вероятности таких событий определяются в задачах оценки риска загрязнения атмосферного воздуха. Для определения вероятностей достаточно иметь опытные данные

по мониторингу загрязнения воздуха на контрольном посту или в населенном пункте в течение некоторого времени (например, года, месяца) и полную информацию о параметрах зависимости «доза-эффект» для определенного вещества.

5. При загрязнении воздуха несколькими вредными веществами на контрольном посту (в городе и населенном пункте) и наблюдении в воздухе опасных концентраций веществ за определенный период времени может реализоваться сложное событие j возникновения кумулятивного негативного эффекта у биологического объекта, связанного с совместным действием нескольких токсикантов.

Экспериментально такая оценка проводится довольно редко, однако имеются сведения о совместном действии аммиака и сероводорода; аммиака, сероводорода и формальдегида; диоксида азота и диоксида серы; озона, диоксида азота и формальдегида; оксида свинца и диоксида серы; оксида углерода и пыли цементного производства и т.д. Подобное комбинированное действие установлено для порядка 60 смесей [31, 44].

Известно, что комбинированное действие вредных веществ – это одновременное или последовательное действие на организм нескольких токсикантов при одном и том же пути поступления их в организм. Выделяют различные виды комбинированного действия вредных веществ (табл. 4.4):

- аддитивное действие представляет собой феномен суммированных эффектов, при этом суммарный эффект равен сумме эффектов действующих компонентов;
- потенцированное действие (синергизм) отличается усилением вредного эффекта. Компоненты смеси действуют при этом так, что одно вещество усиливает действие другого. Эффект комбинированного действия при синергизме больше аддитивного;
- антагонистическое действие представляет собой воздействие, при котором суммарный эффект меньше ожидаемого. Компоненты смеси действуют так, что одно вещество ослабляет действие другого, а общий эффект меньше аддитивного;
- независимое действие формирует комбинированный эффект, который не отличается от изолированного действия каждого вредного

вещества в отдельности. При воздействии преобладает эффект наиболее токсичного вещества.

Без опытных данных, характеризующих комбинированный эффект, оценить риски таких сложных событий можно только для аддитивного и независимого действия веществ и то при условии введения некоторых гипотез о виде событий. В связи с тем, что события формирования негативных эффектов или последствий наблюдаются на протяженных промежутках времени и имеют для различных вредных веществ сложные механизмы реализации, то в данном случае опасные события j следует рассматривать как несовместные. В случае, если эффект биологического действия обладает простым свойством аддитивного действия, то риск такого опасного события j задается в виде аддитивной функции риска для определенного вида воздействия (хронического, острого, рефлекторного, канцерогенного и т.д.):

$$R_j(c) = \sum_{i=1}^{n} R_{j,i}(c_i), \tag{4.6}$$

где риски воздействия могут определяться согласно (4.4), а зависимости «доза-эффект» $w_{j,i}(c_i)$ задаются для каждого вредного вещества и вида негативного эффекта в отдельности. Здесь n – количество воздействующих вредных веществ.

При независимом действии вредных веществ определяются риски воздействия $R_{j,i}(c_i)$ для каждого вещества в отдельности, и выбирается вещество с максимальным значением риска. В свою очередь, для потенцированного и антагонистического действия нескольких вредных веществ необходимо наличие экспериментальных данных по оценке эффекта комбинированного действия.

Следует отметить, что при оценке риска подобные задачи решаются достаточно редко, что связано с недостаточностью знаний о возникновении различных негативных эффектов при совместном действии нескольких вредных веществ.

Таким образом, исходя из имеющихся опытных данных о загрязнении атмосферного воздуха и информации о зависимости «доза-эффект» может быть определено уравнение состояния системы,

представляющее собой многомерное вероятностное распределение. На основе применения понятия уравнения состояния системы, представленного в виде вероятностей или рисков $R_j = R_j\left(\frac{p_1}{p_{1_0}}, \frac{p_2}{p_{2_0}}, ..., \frac{p_n}{p_{n_0}}\right)$ относительно параметров фактора опасности p_i, опасных событий j и безопасных уровней p_{i_0} возможно создание общей теории, основанной на применении аналитических методов, о которой, в свое время, упоминал Маршал. Подобная теория может охватывать системы, где наблюдаются опасные процессы загрязнения окружающей среды.

Покажем, каким образом, используя информацию о распределении вероятности состояния системы, можно получить расчетные зависимости для комплексной оценки и оценки риска при загрязнении атмосферного воздуха в городах и населенных пунктах.

4.5 Метод комплексной оценки загрязнения атмосферного воздуха на основе определения вероятности неблагоприятных событий

Анализ множества работ в области изучения качества атмосферного воздуха показывает, что, несмотря на особую актуальность достоверной комплексной оценки загрязнения атмосферы, задача разработки объективных вероятностных методов оценки опасности, связанной с загрязнением воздуха, исследователями никогда не ставилась. Алгоритмическое определение вероятностей совместных неблагоприятных событий с использованием уже накопленных массивов данных наблюдений, характеризующих загрязнение окружающей среды, позволяет поставить и решить такую задачу.

Целью вероятностного подхода к анализу опасности при загрязнении атмосферы является разработка нового метода комплексной оценки качества атмосферного воздуха на основе определения вероятностей неблагоприятных совместных событий, связанных с превышением концентраций вредных веществ допустимых норм. Данный метод относится к объективным средствам анализа данных, так как не применяет

экспертные подходы. Информационная основа метода состоит в использовании данных наблюдений о загрязнении воздуха в городах, представленных в виде таблично-временных массивов информации за 5 – 10 лет. Состояние загрязнения атмосферы городов изменяется с течением времени, то есть осуществляется некоторый динамический процесс. Данный метод позволяет описать экологическое состояние каждого объекта (города, района, территории) совокупностью наблюдаемых показателей загрязнения воздуха в заданный момент времени.

По данным наблюдений для всех объектов возможно определение статистических вероятностей сложных событий, связанных с загрязнением атмосферного воздуха. Оценить эту статистическую вероятность можно алгоритмически (Приложение Б) для каждой таблицы опытных данных.

Для практического примера методикой исследований предусматривалось использование феноменологических методов анализа данных применительно к совокупности наблюдений Украинского гидрометеоцентра за 2003 – 2012 годы по всем контролируемым вредным веществам (53 города Украины, около 50 тыс. данных). Аналогично изучались данные Росгидромета о загрязнении наиболее крупных городов России вредными веществами (35 городов). Опасность загрязнения оценивалась путем сравнения уровня загрязнения воздуха с действующими нормами.

На основе данных опыта путем сортировки определяются все неблагоприятные события, после чего рассматриваются совместные события одновременного наблюдения показателей загрязнения воздуха. Далее для таких событий алгоритмически определяются статистические вероятности и строится феноменологическая модель данных о загрязнении воздуха с помощью метода, описанного ниже.

Предположим, что в таблично-временных массивах данных содержится количественная информация о концентрациях в атмосферном воздухе n загрязняющих веществ $p_1, p_2, ..., p_n$. Состояние любого объекта (города) в n-мерном пространстве H^n в каждый момент времени будет отображаться многомерной фигуративной точкой $M = M\left(p_1, p_2, ..., p_n\right)$. Тогда процесс изменения состояния объекта во времени будет

характеризоваться кривой в n-мерном пространстве, которая описывается фигуративной точкой $M = M(p_1, p_2, ..., p_n)$ в этом пространстве.

Каждой опытной точке M_i поставим в соответствие некоторую вероятность характерных сложных событий w_i.

Рассмотрим сложное совместное событие A_i одновременного наблюдения нескольких показателей и определим, что состояние изучаемого объекта в заданный момент времени будет характеризоваться не только совокупностью концентраций веществ $(p_{1i}, p_{2i}, ..., p_{ni})$, отображающихся точкой M_i, но и данным наблюдаемым событием. Назовем статистическую вероятность этого события вероятностью состояния изучаемого объекта. Неблагоприятным событием A_i будем считать событие, для которого хотя бы одна наблюдаемая концентрация $p_1, p_2, ..., p_n$ превышает установленные нормы, например, предельно допустимую концентрацию загрязняющего вещества в атмосферном воздухе.

Также как и в главе 2, мы предполагаем непрерывность области H^n. Для построения моделей количественных данных принимаем гипотезу о непрерывности поля вероятности состояния в области H^n. Будем считать, что вероятность состояния системы образует скалярное поле, которое является непрерывным в области H^n. Для построения модели описания процессов предположим, что скалярное поле величины w может быть аналитически описано в окрестности произвольной точки M. Предположим, что в области H^n можно задать аналитическую непрерывную функцию $T(p_1, p_2, ..., p_n)$, на основе которой будет формироваться математическая модель для комплексной оценки. Примем также, что скалярные поля величин w и T однозначно связаны между собой. Если в окрестности любой точки M объект осуществляет некоторый процесс l, то для линии процесса l справедливо соотношение $dw = c_l \cdot dT$, где c_l – величины, являющиеся функциями процесса и подлежащие определению по опытным данным.

В связи с построением вероятностной среды моделирования, будем считать, что аналитическая функция $T(p_1, p_2, ..., p_n)$ может быть

представлена в виде геометрической вероятности $T = \dfrac{p_1 \cdot p_2 \cdot \ldots \cdot p_n}{p_{1\max} \cdot p_{2\max} \cdot \ldots \cdot p_{n\max}}$ пространства состояний системы H^n.

Исходя из предложенных гипотез и полученных ранее результатов, которые изложены во второй и третьей главах монографии, энтропия и потенциал будут выражаться зависимостями (3.21) и (3.23):

$$s - s_0 = c_1 \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_{1_0}}\right) + c_2 \cdot \ln\left(\frac{p_2}{p_{2_0}}\right) + \ldots + c_n \cdot \ln\left(\frac{p_n}{p_{n_0}}\right), \qquad (4.7)$$

$$P(p_1, p_2, \ldots, p_n) = \frac{1}{2}\left(\frac{p_1^2 - p_{1_0}^2}{c_1} + \frac{p_2^2 - p_{2_0}^2}{c_2} + \ldots + \frac{p_n^2 - p_{n_0}^2}{c_n}\right). \qquad (4.8)$$

Энтропию s и потенциал P принимаем в качестве обобщенных критериев для комплексной оценки состояния объектов в многомерном пространстве H^n, так как данные величины являются функциями состояния системы при справедливости условия существования скалярного поля вероятности w.

Результаты анализа данных. Для примера рассмотрим сложное совместное событие одновременного наблюдения четырех наиболее распространенных веществ, загрязняющих атмосферный воздух в городах: пыли, диоксида серы, оксида углерода и диоксида азота. Соответственно введем показатели загрязнения p_1, p_2, p_3, p_4 в виде концентраций этих веществ в атмосферном воздухе. Определим, что уровень загрязнения воздуха будет определяться событием совместного наблюдения концентраций этих веществ. Для того, чтобы разработать систему комплексной оценки уровня загрязнения атмосферного воздуха необходимо иметь возможность определять положение каждого города (при формировании экологических процессов) в пространстве состояний H^4 относительно некоторого опорного состояния. Введем в рассмотрение некоторый объект, показатели загрязнения воздуха для которого равны предельно допустимым концентрациям вредных веществ. Состояние данного объекта примем в качестве опорного, при этом зададим следующие концентрации: для пыли $p_{1_0} = 0{,}15$ мг/м^3; для диоксида серы $p_{2_0} = 0{,}05$ мг/м^3; для оксида углерода $p_{3_0} = 3{,}0$ мг/м^3; для диоксида азота

$p_{4_0} = 0{,}04$ мг/м^3. В связи с тем, что в городах события, связанные с загрязнением атмосферного воздуха различными вредными веществами, обычно зависимы, вероятности таких совместных событий (статистические вероятности состояния w) будем определять алгоритмически [5, 7].

Для поиска нелинейных связей между статистической вероятностью состояния системы и показателями загрязнения воздуха воспользуемся методом пробит-анализа. Для городов Украины свяжем полученную вероятность w с распределениями переменных в массиве опытных данных, в результате чего будем иметь следующую регрессионную зависимость вероятности w от энтропии состояния системы:

$$\Pr ob = -0{,}5045 + s; \quad w = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \int_{-\infty}^{\Pr ob} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt;$$

$$s = 0{,}4379 \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_{1_0}}\right) + 0{,}2832 \cdot \ln\left(\frac{p_2}{p_{2_0}}\right) + 0{,}3962 \cdot \ln\left(\frac{p_3}{p_{3_0}}\right) + 0{,}2963 \cdot \ln\left(\frac{p_4}{p_{4_0}}\right). \quad (4.9)$$

Коэффициент корреляции зависимости (4.9) составил 0,97, результаты обработки данных приведены на рисунке 4.2. Исходные переменные относились к значениям $p_{1_0}, p_{2_0}, p_{3_0}, p_{4_0}$, которые соответствуют выбранному опорному состоянию. Из приведенных данных видно, что феноменологические константы c_l, отражающие процессы загрязнения атмосферного воздуха, исходя из группового поведения объектов, соответственно равны: $c_1 = 0{,}4379$, $c_2 = 0{,}2832$, $c_3 = 0{,}3962$, $c_4 = 0{,}2963$. Алгоритм подсчета вероятности состояния системы является однозначным, поэтому всегда существует функциональная зависимость вероятности w от исходных переменных, которая представляется в табличном виде. Как видно из рисунка 4.2, путем преобразования координат эту нелинейную функциональную зависимость можно представить с определенной степенью точности многомерной плоскостью. Такое приближение существенно упрощает процесс построения модели описания данных.

Согласно зависимостям (4.7) и (4.9) в пространстве наблюдаемых состояний системы H^4 можно построить криволинейные координаты, которые определяют некоторое поле направлений, отражающее

среднестатистические тенденции, связанные с экологическими изменениями во всем изучаемом классе объектов.

Соответствующие функции состояния энтропия s и потенциал P определяют эти естественные криволинейные координаты в пространстве H^4, при этом точка $M(p_1, p_2, p_3, p_4)$, характеризующая окружающую среду каждого города в процессе своего экологического изменения, будет занимать некоторое положение относительно этих координат. Это позволяет объективно определить ранг объекта во множестве других объектов. Потенциал является удобной величиной для определения ранга объекта.

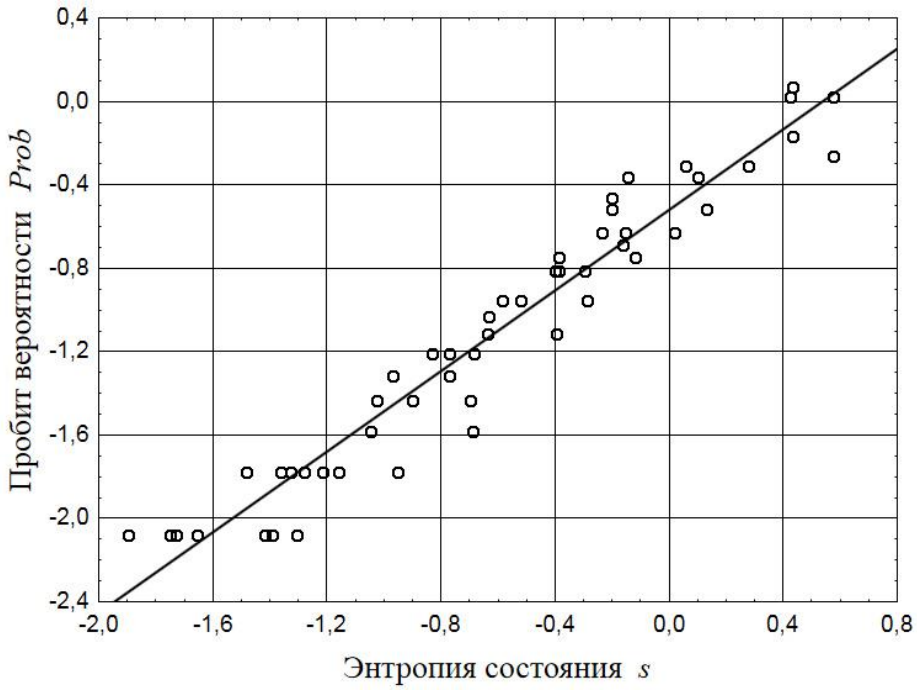

Рисунок 4.2. – Зависимость вероятности w от энтропии состояния s для совместно наблюдаемых значений показателей загрязнения атмосферного воздуха (города Украины)

На основе полученных данных, исходя из вероятностной оценки сложных совместных событий, связанных с одновременным наблюдением показателей загрязнения воздуха p_1, p_2, p_3, p_4, определены энтропия и потенциал состояния для каждого города Украины. Результаты ранжирования объектов по данным наблюдений в 2008 и 2012 году приведены в таблице 4.7.

Таблица 4.7. – Значения потенциала *P* и рейтинги городов Украины, связанные с уровнем загрязнения атмосферы в 2008 – 2012 годах

Города Украины	Потенциал состояния *P* (2008)	Потенциал состояния *P* (2012)	Ранги городов по уровню загрязнения воздуха			
			согласно предложенного метода		согласно расчета *КИЗА*	
			2008	2012	2008	2012
Алчевск	17,83	11,56	6	12	6	11
Винница	-9,83	-7,46	47	46	47	45
Горловка	24,15	15,24	3	9	3	8
Дзержинск	26,15	22,47	2	4	2	4
Днепродзержинск	3,69	14,79	13	11	12	9
Днепропетровск	8,66	14,81	10	10	9	10
Донецк	42,30	37,66	1	2	1	1
Енакиево	20,90	15,32	5	8	4	7
Житомир	0,20	2,76	19	18	19	17
Запорожье	2,55	7,62	14	15	16	16
Ивано-Франковск	1,90	-6,26	15	41	14	40
Киев	-2,28	16,17	25	7	27	12
Кировоград	-5,58	-3,42	34	34	32	30
Красноперекопск	14,87	17,86	8	5	8	5
Кривой Рог	5,51	48,88	12	1	11	2
Лисичанск	-3,27	-3,64	26	36	24	33
Луганск	-10,51	-6,58	48	42	48	43
Львов	1,39	-1,50	16	28	15	23
Макеевка	24,05	36,15	4	3	5	3
Мариуполь	-4,57	-0,11	30	25	30	25
Николаев	-10,53	-7,37	49	45	49	47
Одесса	-0,46	2,88	21	17	18	14
Полтава	-7,11	-3,53	42	35	38	34
Ровно	-6,74	-9,10	39	49	41	49
Рубежное	-0,81	0,70	22	21	20	21
Северодонецк	-3,27	-2,11	26	31	24	26
Суммы	-1,79	-0,84	23	27	21	22
Тернополь	-6,47	-4,46	38	38	37	38
Ужгород	-4,80	-5,56	31	39	31	41
Харьков	-8,72	-7,80	45	47	44	46
Херсон	10,50	2,60	9	20	10	28
Хмельницкий	17,72	9,00	7	13	7	13
Черкассы	-7,23	-7,20	43	44	39	44
Черновцы	-11,84	-9,36	52	50	53	52
Чернигов	0,54	-0,05	18	24	26	31

Из приведенных данных видно, что к первым пяти городам, имеющим в 2012 год самый высокий уровень загрязнения атмосферного воздуха по пыли, диоксидам серы и азота, а также оксиду углерода относятся: Кривой Рог, Донецк, Макеевка, Дзержинск и Красноперекопск.

Для примера, если взять те же вредные вещества и провести расчет комплексного индекса загрязнения атмосферы *КИЗА* по данным наблюдений за 2012 год, то самый высокий уровень загрязнения воздуха будет в городах: Донецк, Кривой Рог, Макеевка, Дзержинск и Красноперекопск.

Уровень загрязнения атмосферного воздуха городов Украины, определенный по методике расчета комплексного индекса загрязнения атмосферы [94], тесно связан с потенциалом состояния *P*, рассчитанным по данному методу. Результаты сравнения даны на рисунке 4.3.

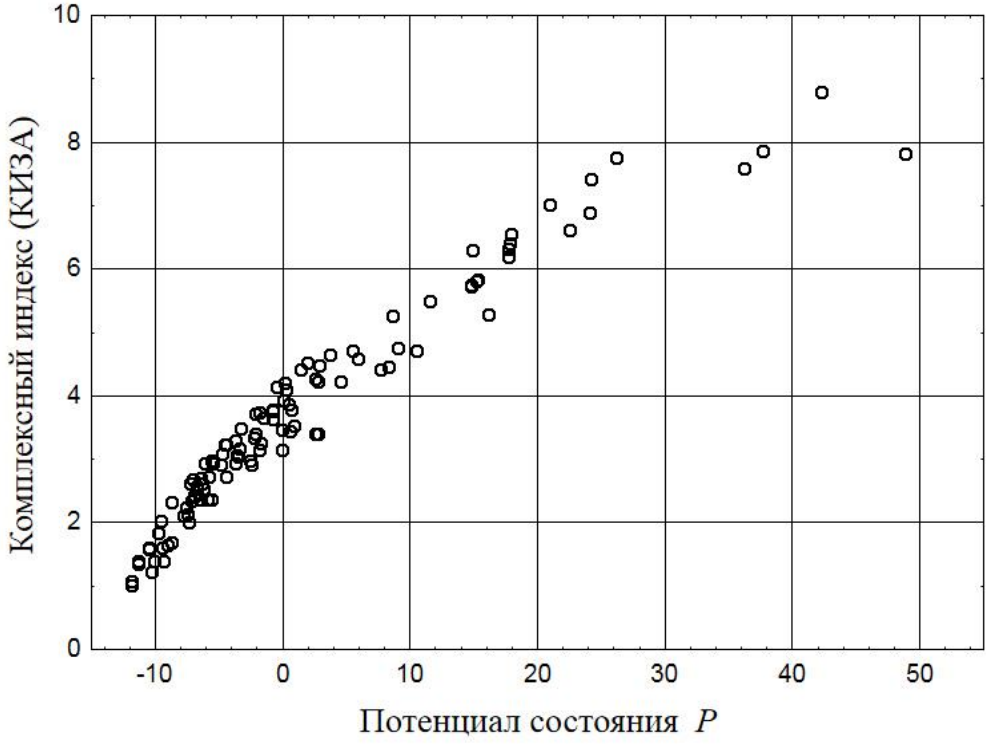

Рисунок 4.3. – Сравнение уровней загрязнения атмосферного воздуха городов Украины по различным методам оценки

Для городов России также свяжем статистическую вероятность состояния системы w с показателями загрязнения воздуха, в результате чего будем иметь следующую регрессионную зависимость вероятности w от энтропии состояния системы:

$$\Pr ob = -0{,}2501 + s; \quad w = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \int_{-\infty}^{\Pr ob} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt;$$

$$s = 0{,}3001 \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_{1_0}}\right) + 0{,}2038 \cdot \ln\left(\frac{p_2}{p_{2_0}}\right) + 0{,}3358 \cdot \ln\left(\frac{p_3}{p_{3_0}}\right) + 0{,}6206 \cdot \ln\left(\frac{p_4}{p_{4_0}}\right). \quad (4.10)$$

Коэффициент корреляции зависимости (4.10) составил 0,89, результаты обработки данных приведены на рисунке 4.4.

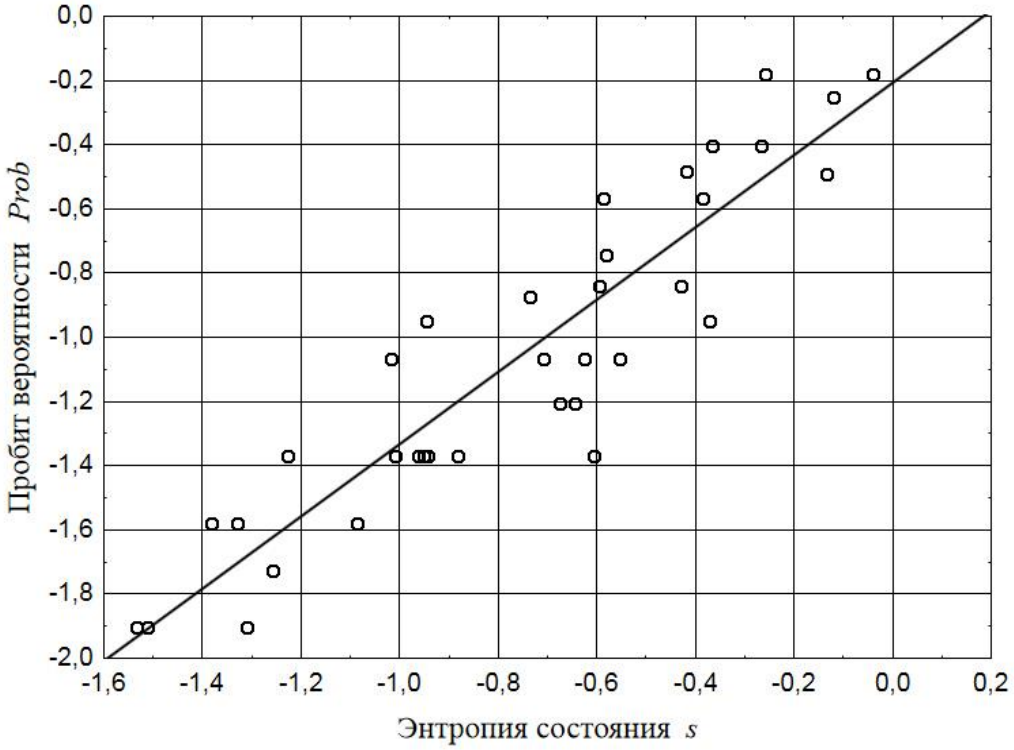

Рисунок 4.4. – Зависимость вероятности w от энтропии состояния s для совместно наблюдаемых значений показателей загрязнения атмосферного воздуха (города России)

Результаты ранжирования российских городов по данным наблюдений приведены в таблице 4.8.

К первым пяти крупнейшим городам России, имевшим в 2007 году самый высокий уровень загрязнения атмосферного воздуха пылью, диоксидами серы и азота, а также оксидом углерода относятся: Воронеж, Хабаровск, Иркутск, Новосибирск и Тюмень. В свою очередь, согласно комплексного индекса загрязнения атмосферы *КИЗА* самый высокий уровень загрязнения воздуха наблюдался в городах: Воронеж, Хабаровск, Казань, Владивосток и Москва.

Таблица 4.8. – Значения энтропии s потенциала P и рейтинги городов крупнейших России, связанные с уровнем загрязнения атмосферы

Крупнейшие города России	Энтропия состояния s (2012)	Потенциал состояния P (2012)	Ранги городов по уровню загрязнения воздуха	
			согласно предложенного метода	согласно расчета *КИЗА*
Астрахань	-1,23	-9,69	29	28
Барнаул	-0,58	-3,61	9	11
Владивосток	-0,26	-3,76	11	4
Волгоград	-0,55	-6,65	20	18
Воронеж	0,14	14,05	1	1
Екатеринбург	-0,43	-5,84	17	13
Ижевск	-1,51	-10,32	33	33
Иркутск	-0,27	-1,75	3	7
Казань	-0,61	-3,72	10	3
Кемерово	-1,09	-8,94	25	24
Киров	-1,38	-10,21	32	32
Краснодар	-0,96	-3,60	8	19
Красноярск	-0,59	-4,84	14	14
Липецк	-1,31	-9,00	26	30
Москва	-0,12	-4,27	12	5
Нижний Новгород	-0,95	-7,13	21	20
Новокузнецк	-0,94	-2,83	6	16
Новосибирск	-0,37	-2,52	4	8
Омск	-1,53	-9,82	31	31
Оренбург	-0,59	-5,74	16	17
Пенза	-1,01	-9,78	30	27
Пермь	-1,33	-9,34	27	29
Ростов-на-Дону	-0,42	-3,50	7	12
Рязань	-1,02	-8,54	24	25
Самара	-0,88	-9,56	28	26
Санкт-Петербург	-0,63	-4,39	13	10
Саратов	-0,65	-6,26	18	15
Тольятти	-0,95	-7,82	22	23
Тула	-2,19	-12,09	35	35
Тюмень	-0,39	-2,79	5	6
Ульяновск	-0,37	-4,87	15	9
Уфа	-0,71	-6,27	19	21
Хабаровск	-0,04	0,67	2	2
Челябинск	-0,68	-7,83	23	22
Ярославль	-2,07	-11,24	34	34

Полученные результаты позволяют предложить новый метод комплексной оценки уровня загрязнения атмосферного воздуха. Особенностью данного метода является использование объективного алгоритмического подхода и отсутствие применения экспертных методов и зависимостей для комплексной оценки. При наличии необходимого количества данных наблюдений о загрязнении природных сред в городах и населенных пунктах предложенный метод может быть использован для комплексной оценки загрязнения как атмосферного воздуха, так и поверхностных и подземных вод, а также почв.

4.6 Метод оценки рисков негативных воздействий на биологические объекты при загрязнении атмосферного воздуха

В данном разделе описан разработанный метод оценки рисков негативных воздействий на биологические объекты при загрязнении атмосферного воздуха, который основывается на выполненных теоретических исследованиях, а также положениях и принципах событийной оценки, сформулированных ниже.

Современная методология оценки экологических рисков предусматривает установление вероятности развития неблагоприятных эффектов и последствий при действии факторов опасности, связанных с загрязнением окружающей среды, на объекты живой природы – человека, животных, растения, биосферу в целом и т.д. [21, 26, 62, 72, 77, 85, 93, 103, 136, 144, 148 –150]. Для каждого объекта устанавливается перечень основных видов негативных воздействий при реализации опасности, которые можно считать сложными опасными событиями.

В качестве приоритетных составляющих, которые следует рассматривать при оценке экологических рисков, предлагается выделять следующие природно-антропогенные объекты и территории:

- природно-промышленные объекты с зонами влияния промышленных предприятий;
- города, населенные пункты, жилые массивы;
- рекреационные территории;

- природные территории и объекты, леса, земли сельскохозяйственного назначения;
- территории и объекты природно-заповедного фонда.

В качестве объектов воздействия (реципиентов) данных природно-антропогенных систем необходимо выделить следующие объекты живой природы: человек, животные, растения, а также биосфера в целом. Следует отметить, что для разных реципиентов оценку рисков при загрязнении атмосферного воздуха необходимо проводить при различных основных видах воздействия, которые отражаются в соответствующих событиях наблюдения неблагоприятных эффектов, а именно (табл. 4.5):

- для человека – при хроническом, остром, рефлекторном и канцерогенном воздействии;
- для животных – при хроническом и остром;
- для растений и биосферы в целом – при хроническом и остром воздействии.

Хроническое воздействие вредных веществ на человека предполагает длительное действие факторов среды обитания, создающих угрозу жизни или здоровью человека или угрозу жизни или здоровью будущих поколений. Оценка риска хронического воздействия вредных веществ основывается на применении безопасных уровней ($ПДК$ или RfC). Для количественной оценки зависимости «доза-эффект» также используются максимально недействующие концентрации $МНК$ или пороговый уровень воздействия $NOAEL_{ch}$, при котором не наблюдается вредный эффект.

Острое воздействие вредных веществ на человека является кратковременным и непрерывным (от 5 – 30 минут до 6 – 8 или 24 часов) и определяется действием веществ, которые вызывают изменение биопоказателей на уровне целостного организма, выходящих за пределы приспособительных физиологических реакций. В этом случае используются безопасные уровни, дифференцированные по продолжительности экспозиции и контингенту лиц, подпадающих под воздействие, а также учитывается тяжесть неблагоприятных последствий для здоровья человека. Безопасные уровни кратковременных воздействий направленны на предупреждение смерти и недопущения развития острых отравлений различной степени или неприятных субъективных ощущений

при непродолжительном, но интенсивном загрязнении атмосферы. В качестве безопасных уровней и порогов воздействий в этом случае могут применяться референтные уровни острых ингаляционных воздействий на население $ARfC$ или пороговый уровень острого воздействия $NOAEL_{ac}$, при котором не наблюдается вредный эффект.

Рефлекторное воздействие вредных веществ обуславливается появлением раздражающих эффектов при действии вещества. Безопасный уровень такого воздействия связан с порогом ощущения запаха. При рефлекторном воздействии веществ на человека оценку диапазонов недействующих концентраций следует осуществлять с учетом данных по порогам запаха [26]. В свою очередь, на пороге запаха риск задается в диапазоне $R = 0{,}1 - 0{,}2$. В качестве показателей опасности используются предельно допустимая максимально разовая концентрация вещества в атмосферном воздухе $ПДК_{м.р.}$ и порог ощущения запаха вещества (как нижняя и верхняя граница области недействующих концентраций).

Канцерогенное воздействие вредных веществ характеризует возникновения новообразований в организме при воздействии факторов окружающей среды. Оценка опасности канцерогенов осуществляется с использованием показателя канцерогенного риска, который представляет собой прирост риска на единицу концентрации. Для оценки канцерогенного действия вредного вещества применяются показатели единичного риска UR_i [1] или фактор канцерогенного потенциала SF_i [2].

Количественную оценку рисков следует выполнять в соответствии со следующими принципами и положениями.

1. При количественном определении риска и при анализе различных видов воздействий используются основные закономерности, признанные в теории опасности и риска: пороговый принцип, безопасные уровни воздействия, индикаторный подход при оценке опасности, зависимости для оценки вероятностей опасных событий, зависимости «доза-эффект» и др.

---

[1] Единичный риск (UR_i) - верхняя доверительная граница дополнительного пожизненного риска, обусловленного воздействием химического вещества в концентрации 1 мкг/м^3 (1 мкг/л). Представляет собой риск на одну единицу концентрации

[2] Канцерогенный потенциал (фактор наклона, фактор канцерогенного потенциала, SF_i) - мера дополнительного индивидуального канцерогенного риска или степень увеличения вероятности развития рака при воздействии канцерогена; единица измерения: 1/(мг/(кг × день)) или (мг/(кг × день)$^{-1}$)

2. Базовым понятием в теории опасности и риска является зависимость «доза-эффект», которая отражает характеристику воздействия и определяет связь между действующим фактором (например, концентрацией загрязняющего вещества) и случаями (вероятностями) неблагоприятных эффектов и последствий у объектов негативного воздействия (например, гибель, острое отравление, хроническая заболеваемость и т.д.). Основой для формирования зависимости «доза-эффект» является количественная информация о влиянии фактора опасности и его последствий для человека. Данная зависимость количественно сугубо конкретна, охватывает области воздействий от безопасных уровней (от крайне низких концентраций) до верхних границ максимально недействующих концентраций (или порогов действия вредных веществ), при которых могут наблюдаться неблагоприятные эффекты у уязвимых групп объектов воздействия.

При изучении возможности возникновения неблагоприятных эффектов и последствий используется известный пороговый принцип, в рамках которого, предполагается, что:

- для неканцерогенных веществ существует безопасный уровень, ниже которого вредные эффекты не возникают;
- для канцерогенных веществ канцерогенные эффекты при воздействии имеют генотоксическое действие и могут возникать при любой дозе вредного вещества.

Основной особенностью оценки экологического риска является установление количественных зависимостей между показателями загрязнения окружающей среды и вероятностью негативных воздействий на объекты живой природы (человека, животных, растения, биосферу в целом и т.д.). Обычно оценка экологического риска осуществляется преимущественно для основных среднечувствительных групп популяций и средних показателей факторов загрязнения среды.

Для оценки индивидуального риска воздействий химических веществ при загрязнении атмосферного воздуха в качестве количественной меры риска принимаются вероятности реализации опасности, которые определяются зависимостями (4.2) – (4.6).

Для оценки риска воздействий канцерогенов на человека при загрязнении окружающей среды в качестве количественной меры риска принимается вероятность развития рака, которая определяется в соответствии общепринятой методологией [26].

3. При количественной оценке вероятности развития неблагоприятных эффектов у объектов воздействия используют критерий дополнительного (атрибутивного) риска.

Атрибутивный (дополнительный) риск определяет долю риска, который обусловлен влиянием вредного фактора окружающей среды и представляет собой вероятность возникновения негативных эффектов, связанных с этим фактором (в % от общего количества этих эффектов у объектов воздействия на изучаемой территории). Если предположить, что возникновение неблагоприятных эффектов связано с большим количеством причин, тогда атрибутивный экологический риск – это дополнительные случаи развития неблагоприятных эффектов, которые обусловлены влиянием вредных и опасных факторов, связанных именно с загрязнением окружающей среды.

Зависимость «доза-эффект» связывает атрибутивный риск с количественной характеристикой фактора негативного воздействия, например, коэффициентом опасности (4.1). Характерный вид зависимости «доза-эффект» в области слабых воздействий иллюстрируется рисунком 4.5.

4. При различных воздействиях используют зависимости «доза-эффект» в виде *S*-образных распределений (логарифмически-нормальные, Вейбулла) с наглядно представленной неопределенностью, что обусловлено вариабельностью данных. Поэтому оценку зависимости «доза-эффект» для хронического, рефлекторного и острого воздействия осуществим путем имитационного моделирования возможной нижней области воздействий для биологических объектов. Данная область охватывает зону порогового уровня и зону недействующего уровня (рис. 4.5), которые наиболее часто наблюдаются при загрязнении воздуха в городах.

Безопасный уровень воздействия (*ПДК* или *RfC*) принимается как минимальное значение диапазона недействующих концентраций, который наблюдается для наиболее уязвимых групп населения (или других

объектов воздействия). Это следует из определения безопасного уровня – воздействие на человека соответствующей концентрации на протяжении всей его жизни, вероятно, не приведет к возникновению недопустимого риска для наиболее уязвимых групп населения.

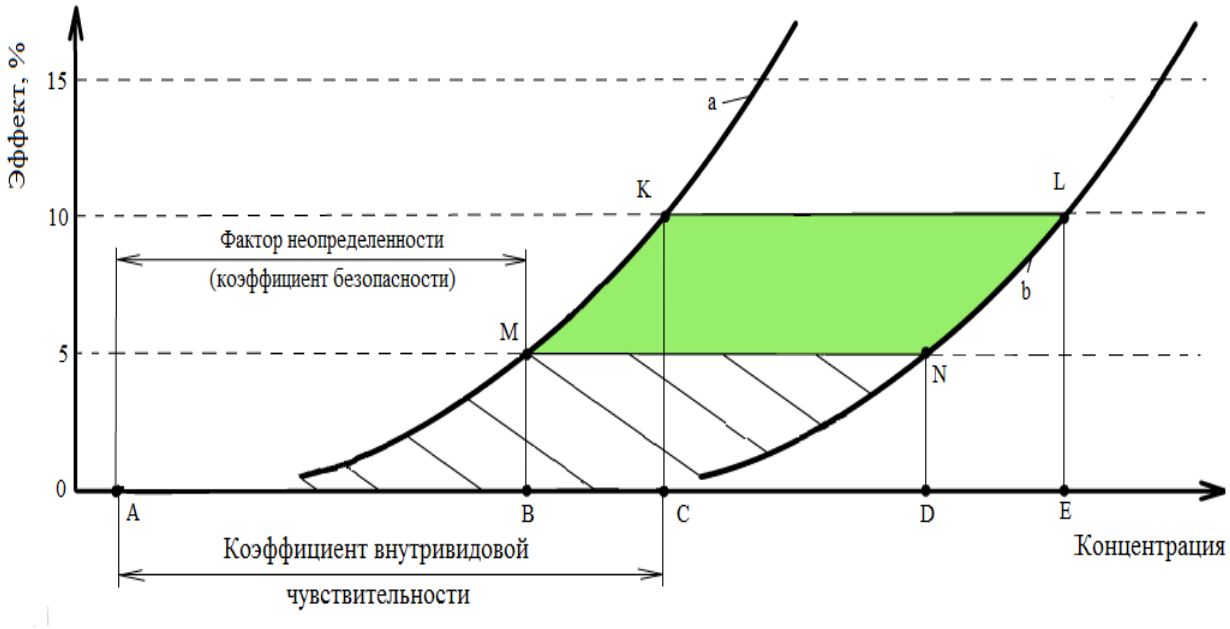

Рисунок 4.5. – Характерный вид зависимости «доза-эффект»:

A – безопасный уровень (*ПДК* или *RfC*);
B – наименьшая величина порога действия;
C – пороговая концентрация;
AC – диапазон максимально недействующих концентраций;
E – наибольшая величина порога действия;
M – опорный уровень риска для уязвимых групп (увеличение частоты вредных реакций на 5 – 10% по сравнению с фоном);
a – зависимость «доза-эффект» для уязвимых групп;
b – зависимости «доза-эффект» для слабоуязвимых групп;
– зона порогового уровня; – зона недействующего уровня.

При хронических воздействиях максимальное значение диапазона недействующих концентраций (максимальное значение *NOAEL*) можно рассматривать как верхнюю границу недействующих концентраций. Эта граница представляет собой максимальную недействующую концентрацию при воздействиях на слабоуязвимые группы.

5. Законодательно допустимые нормы устанавливаются в соответствии с принятыми методиками определения безопасных уровней воздействий вредных веществ. Например, в [26, 81, 93, 136, 136, 150], безопасный для здоровья человека уровень воздействия (*ПДК* или *RfC*)

устанавливается как отношение экспериментально определенной величины порога действия $(P_{hr}, NOAEL)$ к коэффициенту запаса K_z или к произведению фактора неопределенности UF и модифицирующего фактора MF:

$$ПДК = \frac{P_{hr}}{K_z}; \qquad RfC = \frac{NOAEL}{(UF \cdot MF)}. \tag{4.11}$$

Значение порогов действия опасного вещества оценивают с использованием вероятностного подхода путем установления реперных (опорных) концентраций. Выбор порога основывается на вычислении 95% – верхнего гарантийного интервала для опорного уровня риска, характеризующего степень различий в исследуемой и контрольной группах.

Максимальное значение фактора неопределенности UF при внутривидовой экстраполяции принимается равным стандартному значению 10,0, минимальное значение – 1,0. Величину MF, которая определяет достоверность данных, принимают в диапазоне 1,0 – 10,0, для достаточно изученных веществ чаще всего $MF = 1{,}0$. В свою очередь, коэффициент запаса K_z принимается с учетом класса опасности вредного вещества согласно нормативно-методических документов [26, 93].

Аналогичный подход может быть использован и при острых воздействиях на человека, однако в этом случае диапазон внутривидовой уязвимости принимается меньше. Если рассматривать референтную концентрацию острых воздействий как соответствующий безопасный уровень для наиболее уязвимых групп населения, то для наименее уязвимых групп соответствующие показатели недействующей концентрации можно оценить с использованием коэффициента внутривидовой уязвимости 6,0 [93].

6. Диапазон изменения риска при хронических и острых воздействиях в области недействующих концентраций можно задать из предположения, что на безопасном уровне воздействия риск не превышает приемлемый уровень риска (10^{-6}), а на уровне максимально недействующей концентрации (или $NOAEL$) для слабоуязвимых групп риск может быть оценен, исходя из $5-10\%$ увеличения риска возникновения неблагоприятных эффектов по сравнению с риском

природного фона. В свою очередь, при рефлекторном воздействии риск на уровне порога запаха оценивается исходя из 10 – 20 %.

7. Оценка риска для других объектов воздействия, для которых не установлены безопасные уровни при воздействии веществ (животные) или установлены для ограниченного количества веществ (растения, биосфера и т.п.), проводится с учетом коэффициентов межвидовой уязвимости. Для этого используются оценки рисков, которые определены при воздействиях на человека с учетом коэффициентов, приведенных в таблице 4.9.

Таблица 4.9. – Факторы неопределенности при воздействиях вредных веществ (межвидовая экстраполяция с человека на другие объекты воздействия)

Объекты воздействия	Коэффициент межвидовой экстраполяции
Животные	3
Растения	0,5
Биосфера	0,5

8. При оценке риска хронических воздействий по данным наблюдений используется среднее (среднемесячное, среднегодовое) значение концентрации c_{cp}. В случае рефлекторных и острых воздействий используется максимальная концентрация $c_{\max}$ за период наблюдения (но не более 24 часов).

9. Коэффициент опасности $(HQ = c / I)$ рассчитывается отдельно для условий хронического, острого и рефлекторного действия вредных веществ.

Верхний предел возможного риска R_+ определяется как логарифмически-нормальная кривая (3.35), проходящая через две точки (рис. 4.4): $A(HQ = 1; R_p)$ и $M(HQ_n; R_n)$, где R_p – риск, равный 10^{-6}; R_n – риск, равный 0,05 при хроническом и остром действии и 0,1 при рефлекторном действии вредного вещества; $HQ_n = \frac{МНК}{ПДК}$ или $HQ_n = \frac{NOAEL}{RfC}$. Более простая зависимость для оценки верхнего предела

представляется линейно-квадратичной интерполяцией кривой, проходящей через те же точки A и M. В этом случае коэффициенты зависимости по верхней границе определяются в соответствии с уравнением (4.12):

$$R_{+} = a \cdot HQ + b \cdot HQ^{2}, \qquad (4.12)$$

где $$a = \frac{2 \cdot R_p \cdot HQ_n - R_n - R_p}{HQ_n - 1}; \qquad b = \frac{R_n - R_p \cdot HQ_n}{HQ_n - 1},$$

а величины $МНК$ или $NOAEL$ находятся с учетом коэффициентов запаса и внутривидовой уязвимости:

$$МНК = K_z \cdot ПДК \quad \text{или} \quad NOAEL = UF \cdot RfC. \qquad (4.13)$$

Нижняя граница возможного риска R_{-} также определяется согласно логарифмически-нормальной кривой (3.35) или по более простой зависимости как нелинейная экстраполяция распределения Вейбулла:

$$R_{-} = 1 - e^{-\alpha \cdot (HQ-1)^2}, \qquad \alpha = \frac{1}{(HQ_n - 1)^2} \cdot \ln \frac{1}{1 - R_n}, \qquad (4.14)$$

где R_n – риск, равный 0,1 при хроническом и остром действии и 0,2 при рефлекторном действии.

При использовании для оценки риска логарифмически-нормального распределения коэффициенты интерполяции пробит-зависимости (3.35) находятся из уравнений:

$$\Pr ob = a + b \cdot \ln(HQ); \quad a = -4{,}75342; \quad b = \frac{\Pr ob(R_n) + 4{,}75342}{\ln(HQ_n)}. \qquad (4.15)$$

Среднее значение риска определяется путем имитационного моделирования риска в пределах минимального и максимального значений с использованием равномерно распределенного генератора случайных чисел.

10. Канцерогенный эффект оценивается только для человека. Оценка зависимости «доза-эффект» для канцерогенов с беспороговым механизмом действия осуществляется путем линейной экстраполяции данных, которые реально наблюдаются в эксперименте или в эпидемиологических исследованиях при малых дозах. Зависимость $(R_c = SF_i \cdot c)$ получена с учетом определения реперной концентрации, которая характеризуется 95-ти процентным гарантийным интервалом для опорного уровня риска и определяет увеличение частоты вредных реакций на 5 – 10% по сравнению

с контрольным или естественным фоном. Соответствующие зависимости для определения канцерогенного риска приведены в нормативно-методических документах [26, 93].

Указанные выше принципы и расчетные зависимости положены в основу документа «Методика оценки экологических рисков при загрязнении атмосферного воздуха» [55].

Пример практического анализа данных. Для примера рассмотрим загрязнение атмосферного воздуха теми же вредными веществами, что и в разделе 4.5: пылью, диоксидом серы, оксидом углерода и диоксидом азота. Считаем, что известны показатели загрязнения p_1, p_2, p_3, p_4 в виде концентраций этих веществ в атмосферном воздухе. При разработке метода оценки рисков хронического воздействия на биологические объекты примем в качестве безопасного уровня предельно допустимые среднесуточные концентрации: для пыли $p_{1_0} = 0{,}15$ мг/м^3; для диоксида серы $p_{2_0} = 0{,}05$ г/м^3; для оксида углерода $p_{3_0} = 3{,}0$ мг/м^3; для диоксида азота $p_{4_0} = 0{,}04$ мг/м^3.

Изучим связи между вероятностями основных событий загрязнения атмосферного воздуха и концентрациями вредных веществ. Для простых событий загрязнения воздуха пылью, диоксидом серы, оксидом углерода и диоксидом азота распределения вероятностей приведены на рисунке 4.6. Для пыли, оксида углерода и диоксида азота наблюдаются логарифмически-нормальные распределения событий, а для диоксида серы – нормальные.

Соответствующие регрессионные уравнения для значений пробита с коэффициентами корреляции 0,95 – 0,99 могут быть представлены в виде:

$$\text{пыль: } \Pr ob = 0{,}2190 + 1{,}3040 \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_{1_0}}\right); \quad SO_2\text{: } \Pr ob = -1{,}3394 + 4{,}3443 \cdot \frac{p_2}{p_{2_0}};$$

$$CO\text{: } \Pr ob = 1{,}1881 + 1{,}4658 \cdot \ln\left(\frac{p_3}{p_{3_0}}\right);$$

$$NO_2\text{: } \Pr ob = -0{,}0726 + 1{,}7333 \cdot \ln\left(\frac{p_4}{p_{4_0}}\right). \qquad (4.16)$$

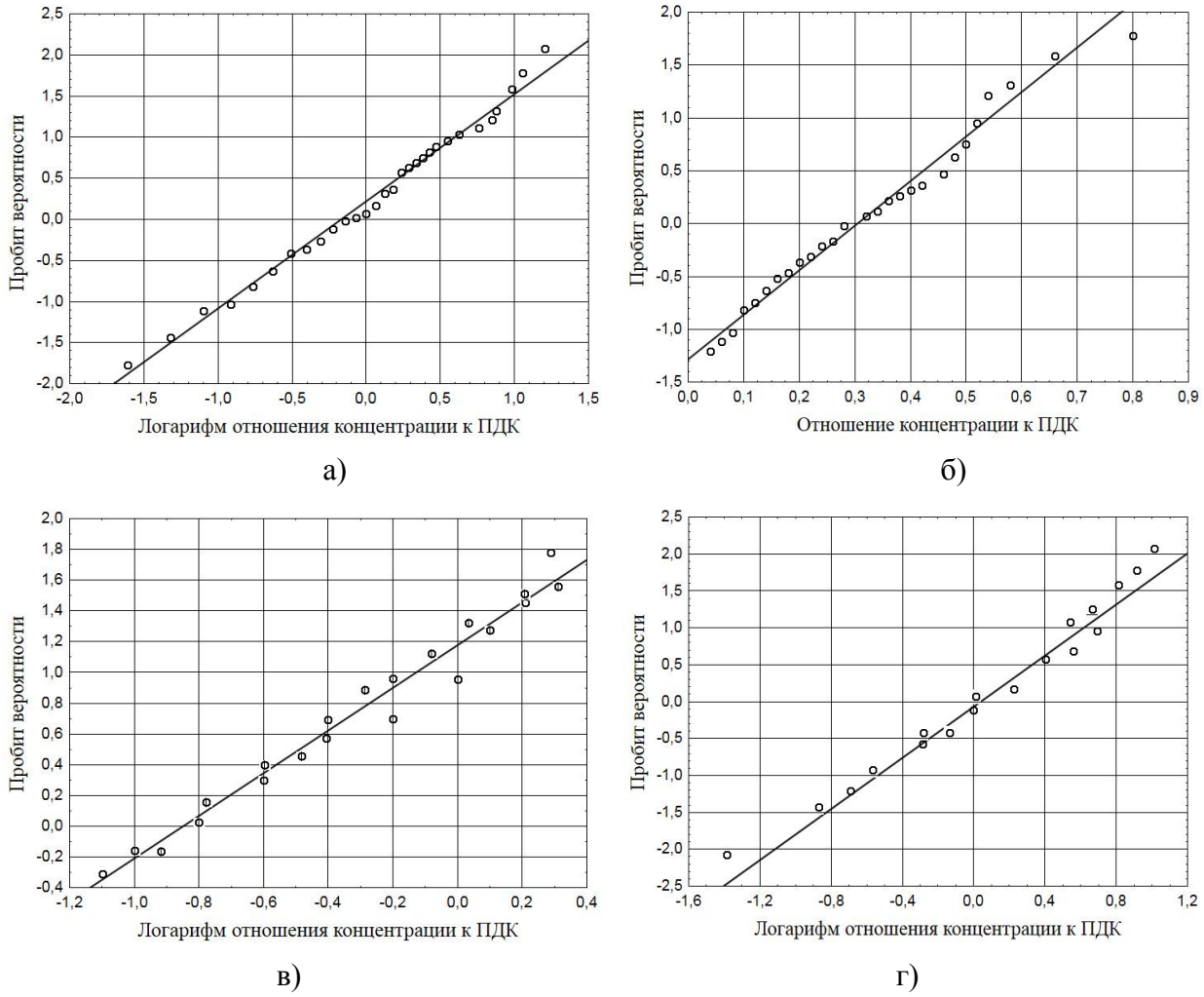

Рисунок 4.6. – Распределение вероятностей событий загрязнения воздуха: а) пыль; б) диоксид серы; в) оксид углерода; г) диоксид азота

В свою очередь, уравнение связи статистической вероятности совместных событий наблюдения концентраций указанных четырех веществ (события j) с вероятностью совместных событий j_n для случая, когда события загрязнения воздуха являются независимыми, имеет вид:

$$w = 0{,}05080 + 1{,}03205 \cdot w_n, \qquad (4.17)$$

где w – статистическая вероятность совместно наблюдаемых значений показателей загрязнения воздуха, определенная непосредственным расчетом; w_n – статистическая вероятность совместно наблюдаемых значений показателей загрязнения воздуха в случае, когда события наблюдения концентраций пыли, диоксида серы, окиси углерода и диоксида азота считаются независимыми. Вероятность w_n определяется согласно (3.28) с учетом зависимостей (4.16). Коэффициент корреляции

уравнения (4.17) составил 0,98. Результаты обработки данных представлены на рисунке 4.7.

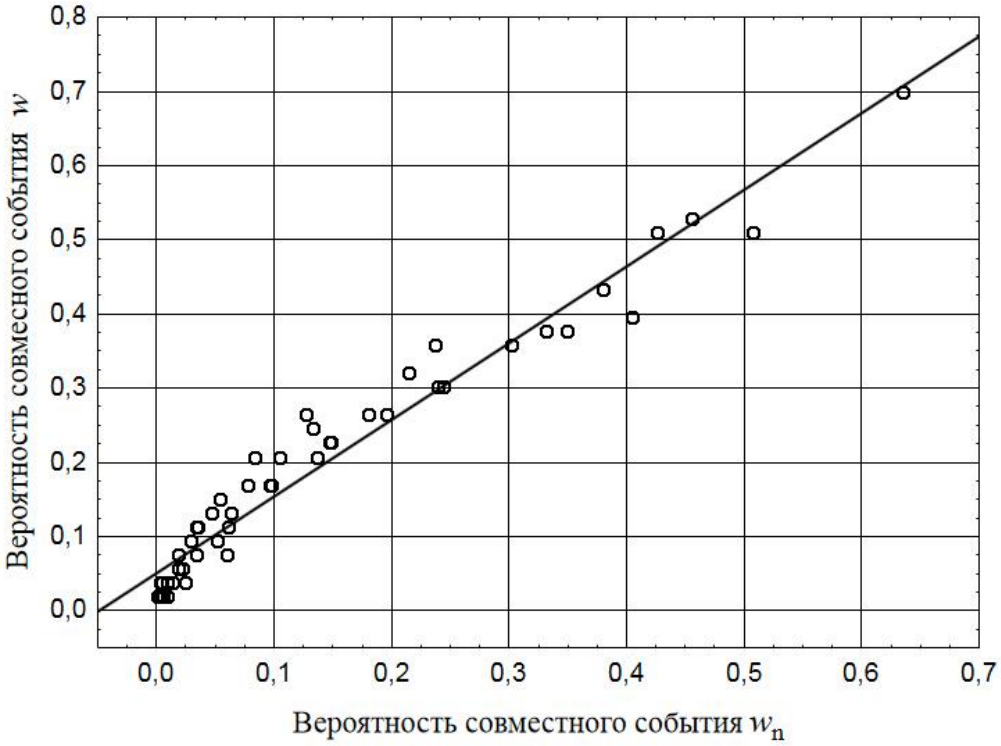

Рисунок 4.7. – Взаимосвязь вероятностей сложных совместных событий, связанных с загрязнением атмосферного воздуха

Особенность данного подхода заключается в том, полученные результаты позволяют оценивать условные вероятности по данным опыта. Например, определим условную вероятность сложного события для совместного наблюдения показателей загрязнения воздуха и события, связанного с загрязнением воздуха пылью. Соответствующие вероятности, в самом общем случае, связаны между собой зависимостью $w(p_1, p_2, p_3, p_4) = w_u(p_1, p_2, p_3, p_4) \cdot w_1(p_1)$, где w_u – условная вероятность, а $w_1(p_1)$ – вероятность распределения концентрации пыли, согласно (4.16). Результаты обработки данных представлены на рисунке 4.8. Соответствующее уравнение с коэффициентом корреляции 0,88 имеет вид:

$$\Pr ob_{wu} = 0{,}2691 + s; \quad w_u = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \int_{-\infty}^{\Pr ob_{wu}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt;$$

$$s = -0{,}3175 \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_{1_0}}\right) + 0{,}4292 \cdot \ln\left(\frac{p_2}{p_{2_0}}\right) + 0{,}5017 \cdot \ln\left(\frac{p_3}{p_{3_0}}\right) + 0{,}4219 \cdot \ln\left(\frac{p_4}{p_{4_0}}\right). \quad (4.18)$$

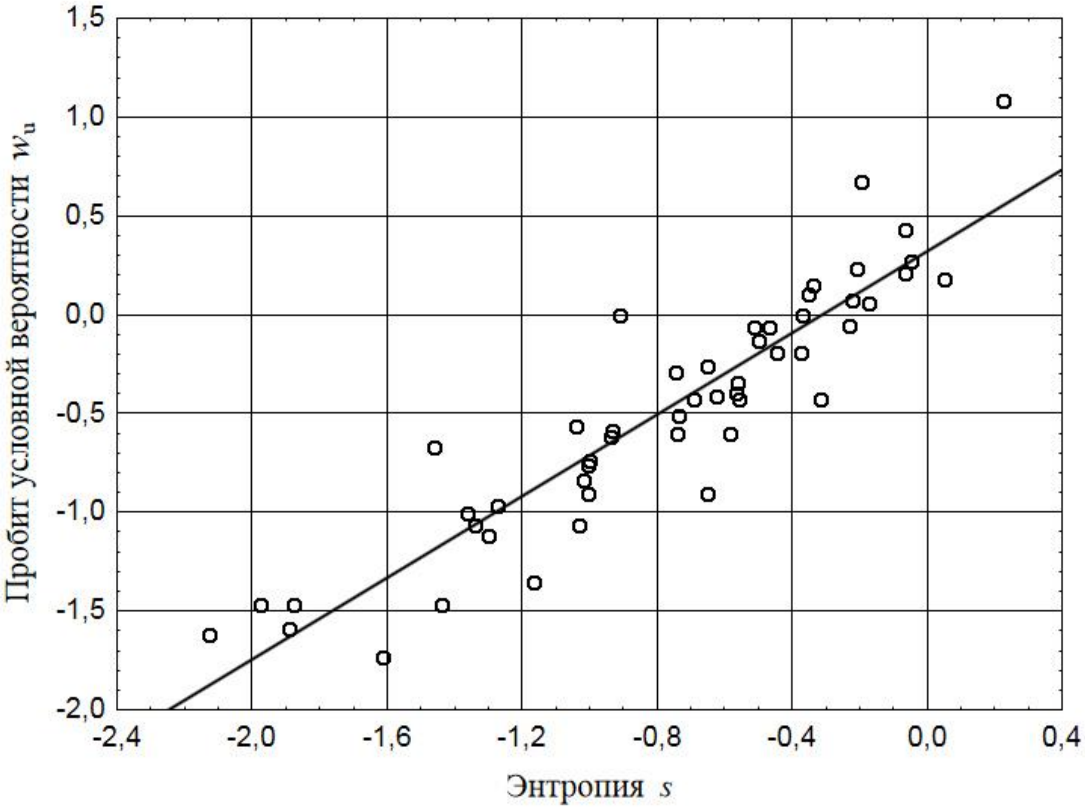

Рисунок 4.8. – Зависимость условной вероятности w_u от показателей загрязнения атмосферного воздуха

Теперь можно показать, что предложенный метод позволяет оценивать риск нанесения вреда биологическому объекту при хроническом воздействии в случае, если известны характеристики зависимости «доза-эффект» для пыли, диоксида серы, окиси углерода и диоксида азота. Используя для каждого вещества зависимости для расчета риска (4.4) и зависимости (4.15) – (4.16), можно получить уравнение оценки риска негативных эффектов при совместном действии нескольких вредных веществ:

$$\Pr ob_r = -4{,}3380 + s; \quad s = 0{,}5093 \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_{1_0}}\right) + 0{,}9353 \cdot \ln\left(\frac{p_4}{p_{4_0}}\right). \qquad (4.19)$$

На рисунке 4.9 представлено данное уравнение в координатах пробит – энтропия, полученное на основе обработки данных о загрязнении атмосферы городов Украины, при этом коэффициент корреляции составил 0,92.

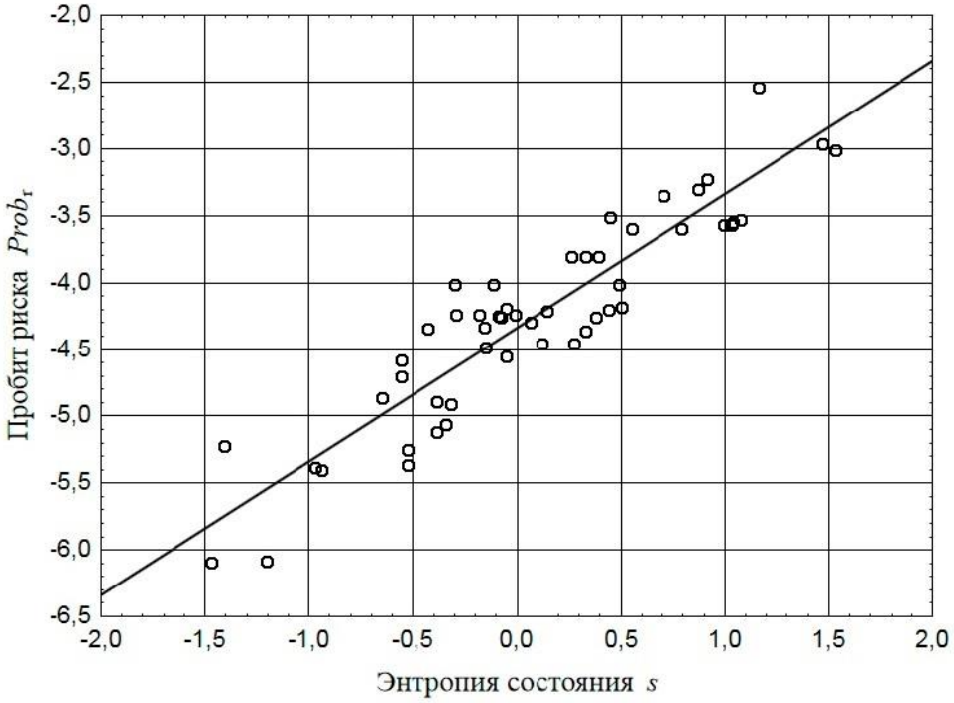

Рисунок 4.9. – Зависимость риска хронического воздействия R от энтропии состояния s (города Украины)

При слабых воздействиях риски совместного действия вредных веществ принимались аддитивными согласно зависимости (4.6). Диоксид серы и оксид углерода не дали значимых связей в уравнении (4.19), что объясняется тем, что хронические воздействия этих веществ, существенно ниже, чем аналогичные воздействия, связанные с пылью и диоксидом азота.

Таким образом, исходя из вероятностной оценки сложных совместных событий, связанных с наблюдением показателей загрязнения воздуха p_1, p_2, p_3, p_4 и нанесением вреда, можно оценить риски хронического воздействия на население.

Результаты ранжирования городов Украины по данным наблюдений приведены в таблице 4.10. Из приведенных данных видно, что к первым пяти городам, имевшим в 2012 году самый высокий уровень риска хронических воздействий на население при загрязнении атмосферного воздуха относятся: Кривой Рог, Макеевка, Донецк, Дзержинск и Киев. Данные таблицы 4.10 несколько отличаются от данных, которые учитывали только уровень загрязнения атмосферного воздуха в городах (табл. 4.7).

Аналогичные результаты были получены при оценке риска негативных воздействий на население при совместном действии нескольких вредных веществ для крупнейших городов России (рис. 4.10):

$$\Pr ob_r = -4{,}5597 + s; \quad s = 0{,}3073 \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_{1_0}}\right) + 1{,}0473 \cdot \ln\left(\frac{p_4}{p_{4_0}}\right). \qquad (4.20)$$

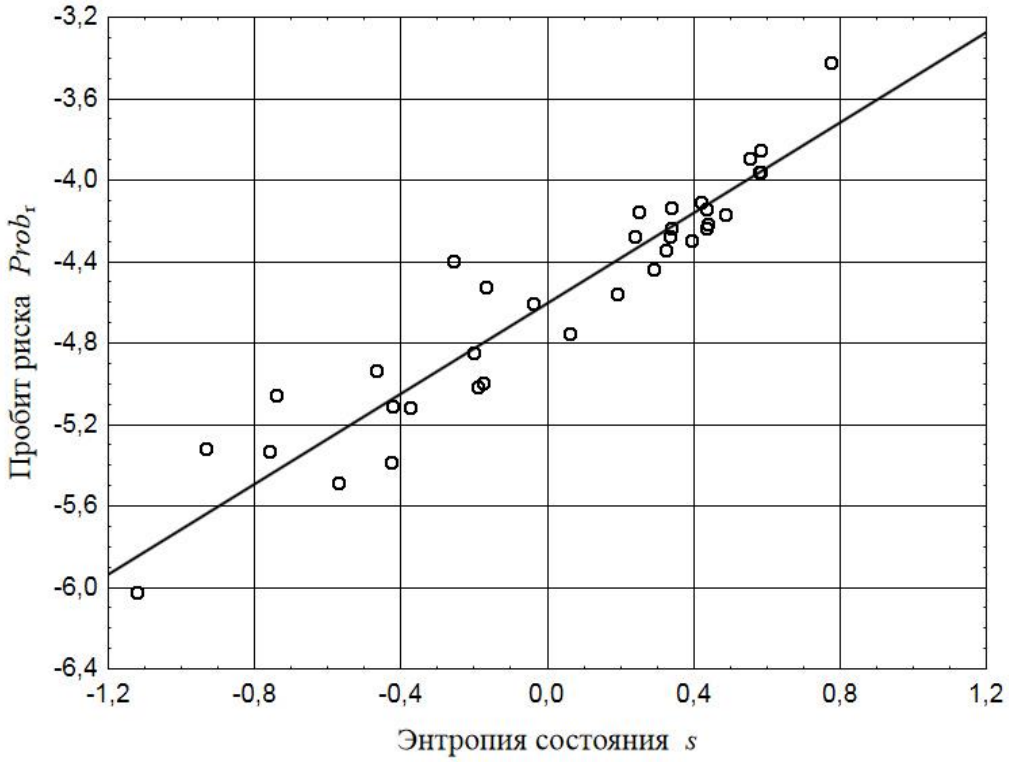

Рисунок 4.10. – Зависимость риска хронического воздействия от энтропии состояния s (крупнейшие города России)

На рисунке 4.10 представлено данное уравнение в координатах пробит – энтропия, при этом коэффициент корреляции составляет 0,90. Результаты ранжирования городов России по значениям риска хронических воздействий приведены в таблице 4.11.

Таким образом, полученные результаты позволяют предложить новый метод оценки рисков негативных воздействий на биологические объекты при загрязнении атмосферного воздуха. Данный метод предусматривает определение вероятности развития неблагоприятных эффектов и последствий при действии факторов опасности при хроническом, остром и рефлекторном воздействии на объекты живой природы – человека, животных, растения, биосферу в целом.

Таблица 4.10. – Значения риска хронического воздействия на население и рейтинги городов Украины, связанные с уровнем негативных воздействий на население в 2008 – 2012 годах

Города Украины	Риск хронического воздействия на население *R*		Ранги городов по уровню риска	
	2008	2012	2008	2012
Алчевск	0,000590	0,000223	5	8
Винница	0,000000	0,000001	45	42
Горловка	0,000749	0,000402	3	7
Дзержинск	0,000606	0,000620	4	4
Днепродзержинск	0,000062	0,000181	15	11
Днепропетровск	0,000179	0,000190	12	10
Донецк	0,002921	0,001299	1	3
Енакиево	0,000584	0,000402	6	6
Житомир	0,000032	0,000030	18	19
Запорожье	0,000079	0,000158	13	15
Ивано-Франковск	0,000009	0,000002	30	40
Киев	0,000032	0,000479	19	5
Кировоград	0,000013	0,000010	24	30
Красноперекопск	0,000301	0,000179	9	12
Кривой Рог	0,000241	0,005612	10	1
Лисичанск	0,000008	0,000007	31	34
Луганск	0,000000	0,000000	48	43
Львов	0,000003	0,000004	33	36
Макеевка	0,001338	0,001523	2	2
Мариуполь	0,000009	0,000015	29	22
Николаев	0,000000	0,000000	49	44
Одесса	0,000005	0,000013	34	24
Полтава	0,000002	0,000004	42	37
Ровно	0,000003	0,000000	37	50
Рубежное	0,000030	0,000030	20	20
Северодонецк	0,000008	0,000007	31	33
Суммы	0,000016	0,000006	23	35
Тернополь	0,000003	0,000003	38	39
Ужгород	0,000004	0,000001	36	41
Харьков	0,000000	0,000000	47	48
Херсон	0,000479	0,000072	8	18
Хмельницкий	0,000492	0,000159	7	13
Черкассы	0,000001	0,000000	44	45
Черновцы	0,000000	0,000000	53	51
Чернигов	0,000078	0,000030	14	21

Таблица 4.11. – Значения риска хронического воздействия на население и рейтинги крупнейших городов России, связанные с уровнем негативных воздействий на население

Города России	Риск хронического воздействия на население *R* (2012)	Ранги городов по уровню риска
Астрахань	0,000003	21
Барнаул	0,000011	14
Владивосток	0,000038	4
Волгоград	0,000010	16
Воронеж	0,000313	1
Екатеринбург	0,000020	6
Ижевск	0,000000	33
Иркутск	0,000012	13
Казань	0,000059	2
Кемерово	0,000005	19
Киров	0,000000	34
Краснодар	0,000014	11
Красноярск	0,000009	17
Липецк	0,000000	26
Москва	0,000017	8
Нижний Новгород	0,000003	22
Новокузнецк	0,000016	9
Новосибирск	0,000013	12
Омск	0,000000	32
Оренбург	0,000005	20
Пенза	0,000001	25
Пермь	0,000000	30
Ростов-на-Дону	0,000007	18
Рязань	0,000000	31
Самара	0,000000	27
Санкт-Петербург	0,000038	5
Саратов	0,000010	15
Тольятти	0,000001	24
Тула	0,000000	35
Тюмень	0,000015	10
Ульяновск	0,000049	3
Уфа	0,000002	23
Хабаровск	0,000018	7
Челябинск	0,000000	28
Ярославль	0,000000	29

Глава пятая

ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ПРИРОДНО-АНТРОПОГЕННЫХ СИСТЕМ

5.1. Общая методика комплексной оценки и многопараметрического ранжирования состояний систем

Важнейшими проблемами, стоящими перед геоэкологией, охраной окружающей среды, глобалистикой, урбанистикой и биологией, является оценка состояния природных, социально-экономических, экологических, урбанизированных, техногенных систем различного иерархического уровня, установление закономерностей и тенденций их развития и прогнозирование динамических процессов, связанных с их поведением. В этом плане основным инструментом анализа являются методы комплексной оценки и оценки риска.

На практике цель комплексной оценки природно-антропогенных систем заключается в оценке состояния систем по совокупности показателей на основе установления их соответствия определенным уровням или нормам, выявлении значимых природных, антропогенных, социальных, экономических и биологических факторов и опасностей и определении масштабов и интенсивности их проявления и воздействия.

При решении прикладных задач в основу моделей для комплексной оценки и оценки рисков могут быть положены вычислительные алгоритмы для определения статистической вероятности состояний систем и теория комплексной оценки, предложенная в предыдущих главах данной монографии. Статистические вероятности определяются по массивам опытных данных для сложных событий одновременного наблюдения нескольких показателей, которые индикативно характеризуют развитие городов, стран или территорий. Это позволяет учитывать вероятностные закономерности распределения данных, отражающих состояние изучаемых систем.

С учетом выполненных исследований общая методика комплексной оценки и многопараметрического ранжирования состояний природно-

антропогенных систем включает следующую последовательность этапов и используемых методов.

1. На первом этапе формируется обоснованная система показателей природно-антропогенной системы, с использованием которых возможна полная и достоверная характеристика состояний изучаемой системы. Эти показатели определяются сложившимися в научном сообществе представлениями о поведении изучаемой системы, литературными данными, имеющимися базами количественных данных, корреляционным анализом используемой информации или другими методами установления наиболее значимых переменных. Комплексная оценка и многопараметрическое ранжирование состояний объектов основывается на использовании данных показателей. Так как предложенные методы не ограничивают количество изучаемых объектов и их показателей, то исходная информация может включать от десятков до сотен показателей развития природно-антропогенных систем. При изучении различных аспектов развития систем с целью эффективности анализа информации обработка данных и поиск закономерностей осуществляется по группам из трех – пяти показателей. При этом необходимо стремиться к тому, чтобы используемые атрибутивные показатели отличались информативностью, значимостью и вариабельностью, и в совокупности были достаточны для комплексного описания состояния системы в определенном ее аспекте. Также следует учитывать, что увеличение значений некоторых показателей может приводить к улучшению качества общего состояния системы. В свою очередь, увеличение значений других показателей может давать противоположный эффект. Могут быть также показатели, которые сложно однозначно отнести к той или иной категории.

2. Далее составляется база данных показателей и индикаторов для определенного вида природно-антропогенной системы, в которой изучаемые объекты и информация о них представляется строками таблиц базы данных, а показатели, определяющие состояния объектов системы, – колонками таблиц. Различные таблицы соответствуют различным моментам времени сбора информации о состоянии системы. Все ячейки массивов должны быть заполнены количественной информацией, при

отсутствии значений показателей проводится интерполяция или экстраполяция данных различными методами.

3. На следующем этапе выбираются наиболее характерные события, которые свойственны изучаемой природно-антропогенной системе и которые в определенном аспекте могут характеризовать состояния объектов в процессе их изменения и развития. В качестве таких событий рассматриваются самые разные сложные события (как опасные, так и не опасные), которые характеризуют изменения в состояниях систем, особенности поведения этих систем или некоторые ситуации, связанные с наблюдением опасных и негативных событий или нанесением ущерба. Также выделяются совместные события одновременного наблюдения атрибутивных показателей, однозначно характеризующих в определенном аспекте состояния изучаемой системы по факту изменения выбранных свойств. Вероятности этих совместных событий определяют вероятность состояния системы. Выбираются методы оценки статистических вероятностей событий, как для различных характерных событий, так и для совместных событий наблюдения свойств системы.

Теоретически или алгоритмическим путем определяются вероятности различных событий и ищутся связи между вероятностями этих событий с использованием методов множественной линейной и нелинейной регрессии.

4. Далее изучаются особенности той или иной природно-антропогенной системы и формулируются способы задания комплексного индекса $T = T(p_1, p_2, ..., p_n)$ на основе выбранных атрибутивных показателей, входящих в базу данных данного вида природно-антропогенной системы.

Для наиболее полной оценки могут задаваться различные комплексные индексы и в дальнейшем их окончательный выбор будет осуществляться исходя из критериев наилучшего приближения опытных данных и применения вариативных расчетов. Скалярное поле комплексного индекса формирует среду моделирования для изучаемой природно-антропогенной системы.

В теоретическом плане на данном этапе на основе атрибутивных показателей формируется трех, четырех или пятимерное пространство

координат $(p_1,...,p_n)$, в котором возможные состояния изучаемой системы (все объекты) образуют некоторую область, охватывающую все наблюдаемые точки базы данных. В данном пространстве состояние каждого объекта представляется многомерной точкой. На основе комплексного индекса T разрабатывается математическая модель вероятностного пространства. Считается, что опытные точки из базы данных являются ограниченной выборкой наблюдений из некоторой генеральной совокупности множества состояний однотипных объектов, которые формируют данную природно-антропогенную систему.

5. На следующем этапе изучаются связи между вероятностями и показателями состояния системы с учетом зависимостей, приведенных в теоретических частях данной монографии. Статистическим анализом устанавливаются регрессионные зависимости, характеризующие связь статистической вероятности состояния системы с комплексным индексом. Это позволяет установить различные вероятностные распределения, характеризующие изучаемую систему. Ищутся также зависимости, определяющие связь вероятности состояния системы с атрибутивными показателями и вероятностями различных характерных событий, свойственных изучаемой природно-антропогенной системе. Это один из наиболее трудоемких этапов исследования, так как требуется проведение значительного числа вариантных расчетов для различных перечней атрибутивных показателей, разных характерных событий и выбранных комплексных индексов. Данный этап позволяет находить феноменологическое константы, характеризующие процессы изменения состояний природно-антропогенных систем, для чего применяются различные методы статистического анализа данных. Точность разработанных моделей проверяется путем сравнения результатов, полученных на основе расчетных зависимостей, с опытными данными.

6. Далее формулируются практические методы комплексной оценки и многопараметрического ранжирования природно-антропогенных систем. Исходя из выполненных теоретических исследований и полученных уравнений, определяются функции состояния в виде энтропии и потенциала состояния системы. Данные функции представляют собой многомерные поверхности уровня и координатные линии в линейно

преобразованном вероятностном пространстве, свойственном изучаемой базе данных. Для всех объектов осуществляются практические расчеты, используются модели комплексной оценки и устанавливаются закономерности и особенности опасных событий и процессов, оценивается риск таких событий, исходя из определения вероятности и связей между вероятностями различных событий. На последнем этапе по энтропии и потенциалу состояния, а также рискам событий, определяются ранги объектов и осуществляется многопараметрическое ранжирование объектов всей системы для различных аспектов их развития.

Цель четвертой и пятой глав монографии направлена на то, чтобы показать универсальность предложенной методики для решения практических задач комплексной оценки различных видов систем. Применим данную методику к решению прикладных задач оценки развития городов, стран и других природно-антропогенных и социальных систем.

5.2 Комплексная оценка состояния и развития городов Европы и мира

В конце XX века постепенно сложилась новая идеология городского планирования, в которой условия жизни в городе и уважение к человеку играют ключевую роль. Многие большие и малые города являются соискателями статуса «Зеленые города планеты» и стремятся попасть в перечень самых зеленых городов мира. Понятие «зеленый город» сегодня связано с формированием определенной передовой стратегии развития городов и их ускоренного строительства с учетом создания высококачественной городской среды.

Сегодня из более чем 2,5 миллионов населенных пунктов Земли, имеющих статус города, признанных «зеленых городов» насчитывается чуть более 150, причем их основное количество (почти 120) находится в Западной Европе и Северной Америке. На фоне зеленых городов уже формируется малочисленная группа населенных пунктов, которые относят к зеленым городам будущего: Масдар (Абу Даби, ОАЭ), Донгтан и Тяньцзинь (Китай), Виктория (Канада).

Надо отметить, что города развиваются различными темпами. Современный мир урбанизирован, ритм и качество городской жизни с каждым годом привлекает все больше и больше людей. В 2007 году 50% населения Земли проживало в городах, к 2050 году доля городского населения составит 70%. Города потребляют 67% мирового производства энергии, на их долю приходится до 70% всех выбросов парниковых газов и почти 80% отходов. Над крупными городами атмосфера содержит в 10 раз больше пыли и в 25 раз больше вредных газов. Именно поэтому стратегическое городское планирование становится все более актуальным и необходимым.

Сегодня уже видны контуры глобальных проблем городов. Все эти проблемы решаемы, если уделяется повышенное внимание к человеку. Город для людей должен быть зеленым, живым, безопасным и здоровым местом для жизни. В «зеленых городах» много внимания уделяют развитию разноплановой экономики и городского хозяйства, качеству городской жизни и озеленению, здоровью и отдыху населения, совершенствованию общественного транспорта и снижению интенсивности движения автомобилей, чистоте воздуха и водоемов, расширению общественных пространств и пешеходных зон, решению экологических проблем и обеспечению безопасности во всех ее аспектах.

Каждый признанный зеленый город мира имеет свои самобытные особенности. Рейкьявик стремиться стать самым чистым и энергоэффективным городом Европы, Портленд считается городом музеев, театров, роз и парковых аллей. Бразильский город Куритиба славится своей системой общественного транспорта и зелеными насаждениями, а Мальме (Швеция) известен парками и образцовым городским хозяйством. Канадский Ванкувер признан одним из самых красивых и благополучных городов мира, а Копенгаген отличается наличием множества музеев, исторических достопримечательностей и заслуженно считается самым «велосипедным» городом Европы.

Каждый из зеленых городов преуспел в одной или нескольких областях городского строительства, благоустройства или сферы услуг. Исходя из их успехов, сегодня сформирован образ города, который будет

удобным и комфортным для жизни людей. В таблице 5.1. приведены некоторые характеристики зеленых городов Европы и мира.

Таблица 5.1. – Зеленые города – лучшие достижения в политике градостроительства

Показатель или критерий	Значение	Город
Кол-во зеленых насаждений на 1 жителя, $м^2$	125	Сан-Франциско
Валовые выбросы CO_2 на 1 жителя, тонн	2,2	Осло
Жители, использующие обществ. транспорт, %	75	Куритиба
Жители, использующие велосипеды, %	50	Копенгаген
Жители, передвигающиеся пешком, %	37	Барселона
Доля возобновляемых энергоресурсов в энергобалансе города, %	90	Ванкувер
Протяженность велодорожек на 1 жителя, км	0,35	Копенгаген
Потребление воды, $м^3$/чел.·год	53,5	Амстердам
Качество воздуха, сравнение с нормами ЕС по 4 вредным веществам	ниже безопасного уровня	Вильниус
Доля перерабатываемых отходов, %	43	Амстердам
Количествово мест в уличных кафе в центре города, тыс. ед./$км^2$	5 – 6	Копенгаген Мельбурн
Количество жителей, довольных своим городом, %	99	Куритиба

Города в различных регионах мира сильно отличаются между собой по численности населения, инфраструктуре, доходам, структуре промышленности и сферы услуг, эффективности ведения городского хозяйства и уровню благосостояния. При этом большинство стран мира ориентируется на общеизвестные рейтинги Mercer Human Resource Consulting и The Blacksmith Institute.

Сегодня в рейтинг городов мира, который ведется известной международной консалтинговой компанией Mercer, попадает более 200 городов. Из российских и украинских городов в рейтинге присутствуют только Москва, Санкт-Петербург и Киев. В 2012 году Москва по уровню качества жизни занимала 153 место, города Санкт-Петербург и Киев соответственно – 163 и 158 место. По рейтингу развития инфраструктуры Москва занимала 123, Санкт-Петербург и Киев соответственно – 160 и 146 места.

В свою очередь Siemens (*http://www.siemens.com/cities/*) ведет Европейский рейтинг зеленых городов, некоторые показатели и характеристики Европейских столиц приведены в таблице 5.2. Методология комплексной оценки городов Европы была разработана фирмой Economist Intelligence Unit совместно с корпорацией Siemens. Их методика основана исключительно на экспертных оценках. В процессе оценок рассматривались восемь аспектов развития городов, для чего выделены следующие категории показателей в областях: выбросы диоксида углерода; потребление энергии; городские здания; транспорт; водопользование; отходы и землепользование; качество воздуха; экологическое управление. Шестнадцать из 30 показателей, используемых для оценки индекса (City Index) являются количественными, остальные – качественные. Данные соответствуют периоду 2007 – 2009 годов. Чтобы сравнивать данные все показатели нормируют по шкале от 0 до 10 баллов. Общий индекс построен как количественная сумма всех категорий с учетом задания весов, назначенных экспертами. Подробно методология комплексной оценки городов Европы приведена в отчете [131].

Таблица 5.2. – Показатели и характеристики европейских столиц

Показатель или характеристика	Копен-гаген	Бер-лин	София	Вар-шава	Осло	Рига	Прага	Киев
Население, тыс. чел.	504	3400	1200	1700	549	717	1200	2700
ВВП на душу населения по паритету покупательной способности, тыс. евро €	43,6	21,6	13,0	31,0	59,5	18,5	25,0	4,9
Валовые выбросы диоксида углерода на душу населения, тонн	5,4	6,6	4,3	6,3	2,2	4,0	8,1	4,1
Потребление энергии на душу населения, гигаджоулей	80,6	77,7	80,7	49,8	94,8	69,2	67,2	87,2
Доля возобновляемых источников энергии, потребляемой в городе, %	18,7	1,84	1,4	7,1	64,8	7,1	1,0	0,5
Доля граждан, передвигающихся общественным транспортом, велосипедами или пешком, %	68,0	54,8	75,4	70,0	57,0	73,4	67,0	89,0
Среднегодовое потребление воды на душу населения, $м^3$	147,0	55,6	188,5	180,8	172,0	90,1	84,6	265,6
Доля перерабатываемых отходов, %	23,6	35,0	0	19,3	26,6	8,0	13,8	0

На основе разработанных методов [4 – 5, 7, 48, 49, 52, 53, 122, 123, 152] построим альтернативную методику комплексной оценки и сравнения городов Европы по показателям их развития [124, 131, 143]. Данная методика не использует экспертных подходов при исследовании разноплановой информации и основана на объективных методах анализа данных.

Возьмем в качестве атрибутивных переменных для комплексной оценки развития городов Европы следующие показатели: ВВП на душу населения по паритету покупательной способности p_1, тыс. евро €; валовые выбросы углекислого газа на душу населения p_2, тонн/чел; среднегодовое потребление воды на душу населения p_3, м^3/чел.

На основе переменных p_1, p_2, p_3 сформируем трехмерное пространство координат, в котором возможные состояния изучаемой системы (все столицы Европы) образуют некоторую область H^3, охватывающую все наблюдаемые точки базы данных. Рассмотрим сложное совместное событие одновременного наблюдения указанных выше трех показателей и определим, что состояние каждого города может оцениваться данным наблюдаемым событием. Найдем статистическую вероятность этого события на основе опытных данных, имеющихся в базе данных [131], с использованием алгоритмов группировки и подсчета частот благоприятных событий [5, 7]. Считаем данную статистическую вероятность вероятностью состояния изучаемой системы. Эта статистическая вероятность w подсчитывается во всей группе объектов (по 30 городам Европы).

Зададим аналитическую непрерывную функцию T, на основе которой будет формироваться математическая модель вероятностного пространства в виде меры относительных изменений (3.4). Исходя из результатов третьей главы, получим, что энтропия состояния в этом случае будет представлена функцией состояния вида (3.21), а потенциал состояния системы в виде функции (3.23).

Поиск нелинейных связей между статистической вероятностью состояния объектов и принятыми показателями развития городов будем основывать на нахождении зависимости (3.41). Введем в рассмотрение значения опорных показателей, в качестве которых примем показатели

города, занимающего последнее место в рейтинге – город Киев. В результате получим следующие данные: $p_{1_0} = 4{,}9$ тыс. евро €; $p_{2_0} = 4{,}1$ тонн/чел; $p_{3_0} = 265{,}6$ м^3/чел. На основе приведенных данных получим опорную точку M_0, которая характеризует объект с самым низким рейтингом развития по версии Siemens.

Свяжем вероятность w со значениями переменных в массиве опытных данных, в результате чего будем иметь следующую регрессионную зависимость величины w от энтропии состояния системы:

$$\Pr ob(w) = -1{,}444 + s\,;\; s = 0{,}501 \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_{1_0}}\right) + 1{,}169 \cdot \ln\left(\frac{p_2}{p_{2_0}}\right) + 0{,}858 \cdot \ln\left(\frac{p_3}{p_{3_0}}\right). \quad (5.1)$$

Коэффициент корреляции зависимости (5.1) составил 0,83, результаты обработки данных приведены на рисунке 5.1. Исходные переменные относились к значениям $p_{1_0}, p_{2_0}, p_{3_0}$, которые соответствуют опорному состоянию. Из приведенных данных видно, что феноменологические константы c_1, c_2, c_3 для изучаемого случая соответственно равны: $c_1 = 0{,}501$, $c_2 = 1{,}169$, $c_3 = 0{,}858$. Как видно из рисунка 5.1, путем преобразования координат нелинейную зависимость вероятности можно представить приближенной линейной функцией.

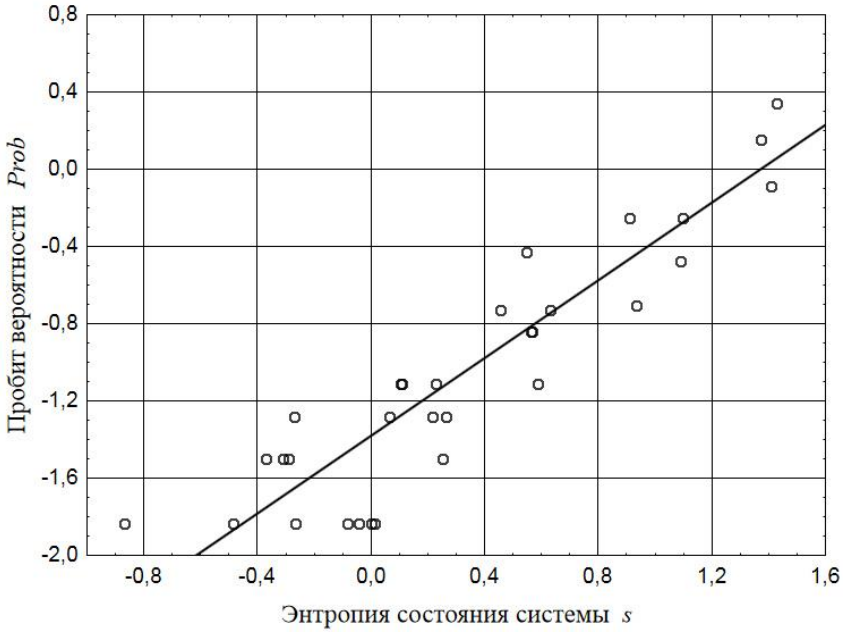

Рисунок 5.1. – Зависимость статистической вероятности состояния w от энтропии s для совместно наблюдаемых значений показателей p_1, p_2, p_3

Таблица 5.3. – Значения энтропии s, потенциала P и рейтинги городов Европы, связанные с уровнем их развития

Города Европы, страны	Энтропия состояния s	Потенциал состояния P	Ранги городов по уровню развития	
			согласно предложен-ного метода	согласно метода Siemens, *City Index*
Амстердам, Нидерланды	0,2685	140,8	6	5
Афины, Греция	0,5457	70,8	13	22
Белград, Сербия	-0,0838	10,7	29	28
Берлин, Германия	-0,0420	37,0	22	8
Братислава, Словакия	0,0653	38,4	21	20
Брюссель, Бельгия	-0,2656	201,3	3	9
Будапешт, Венгрия	0,2157	44,9	20	17
Бухарест, Румыния	0,1043	30,1	23	29
Копенгаген, Дания	0,9095	155,9	5	1
Дублин, Ирландия	1,4273	131,4	7	21
Хельсинки, Финляндия	0,5659	229,7	2	7
Стамбул, Турция	-0,8682	14,3	27	25
Киев, Украина	0,0000	0,0	30	30
Лиссабон, Португалия	0,5638	50,5	18	18
Любляна, Словения	-0,3713	52,0	16	19
Лондон, Англия	0,2039	165,3	4	11
Мадрид, Испания	-0,3107	48,9	19	12
Осло, Норвегия	0,1503	291,0	1	3
Париж, Франция	0,4553	98,7	10	10
Прага, Чехия	0,6308	51,4	17	24
Рига, Латвия	-0,2908	25,4	25	15
Рим, Италия	-0,2711	61,4	14	14
София, Болгария	0,2503	11,6	28	29
Стокгольм, Швеция	0,5855	126,3	8	2
Таллин, Эстония	0,0130	57,2	15	23
Вена, Австрия	0,2297	100,5	9	4
Вильнюс, Литва	-0,4852	18,7	26	13
Варшава, Польша	1,0964	78,4	12	16
Загреб, Хорватия	0,2660	28,7	24	26
Цюрих, Швейцария	0,1082	84,7	11	6

Таким образом, в пространстве состояний системы H^3 можно построить криволинейные координаты, которые определяют поле направлений, отражающее тенденции, связанные с развитием городов Европы. Данные города могут быть ранжированы по совокупности показателей развития за счет определения потенциала состояния в пространстве переменных (p_1, p_2, p_3). Комплексная оценка осуществляется путем определения положения каждого города в криволинейных координатах данного пространства с учетом среднестатистических тенденций развития всех городов. Оценка осуществляется по отношению к опорной точке M_0. Ранги городов устанавливались по убыванию значения потенциала, рассчитанного согласно зависимости (3.23). Поэтому, с учетом вероятностной оценки совместных событий, связанных с одновременным наблюдением нескольких показателей развития городов, можно проводить их взаимное сравнение между собой на основе имеющихся данных.

Из приведенного примера видно, что базы данных показателей развития городов в комплексе с методами комплексной оценки, основанными на определении вероятностей событий, позволяют установить закономерности их развития и осуществить многопараметрическое ранжирование городов в пространстве нескольких показателей.

5.3 Комплексная оценка экологического состояния стран Европы

Теперь проиллюстрируем предложенный метод комплексной оценки на примере разработки методики сравнения стран Европы по экологическим показателям [47, 52]. Возьмем в качестве атрибутивных переменных для оценки развития стран следующие экологические показатели: суммарные выбросы парниковых газов на душу населения p_1, тонн CO_2-экв./чел.; долю охраняемых территорий в общей площади земли p_2, %; долю сельскохозяйственных земель в общей площади земли p_3, %. Для решения поставленной задачи воспользуемся базами данных [38 – 40, 42, 47, 76].

На основе переменных p_1, p_2, p_3 сформируем трехмерное пространство координат H^3, в котором возможные состояния изучаемой системы (все страны Европы) теоретически образуют некоторую область, охватывающую все наблюдаемые точки базы данных. В этом случае состояние каждой страны может быть представлено трехмерной точкой $M(p_1, p_2, p_3)$ в этом пространстве.

Рассмотрим сложное совместное событие одновременного наблюдения указанных выше трех показателей и определим, что экологическое состояние каждой страны Европы может оцениваться данным наблюдаемым событием. Найдем статистическую вероятность этого события на основе опытных данных [47]. Эта статистическая вероятность w подсчитывается во всей группе объектов (по 52 странам Европы).

Зададим аналитическую функцию $T(p_1, p_2, p_3)$, на основе которой будет формироваться математическая модель вероятностного пространства в виде меры относительных изменений (3.4):

$$T = \frac{p_1 \cdot p_2 \cdot p_3}{p_{1_0} \cdot p_{2_0} \cdot p_{3_0}}. \tag{5.2}$$

Исходя из результатов третьей главы, получим, что энтропия будет представлена функцией состояния вида:

$$s = c_1 \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_{1_0}}\right) + c_2 \cdot \ln\left(\frac{p_2}{p_{2_0}}\right) + c_3 \cdot \ln\left(\frac{p_3}{p_{3_0}}\right), \tag{5.3}$$

а потенциал состояния объектов:

$$P = \frac{p_1^2 - p_{1_0}^2}{c_1} + \frac{p_2^2 - p_{2_0}^2}{c_2} + \frac{p_3^2 - p_{3_0}^2}{c_3}. \tag{5.4}$$

Для поиска нелинейных связей между статистической вероятностью состояния системы и экологическими показателями воспользуемся методом регрессии применительно к нахождению зависимости (5.3).

Введем в рассмотрение значения опорных экологических показателей. Суммарные выбросы парниковых газов на душу населения p_1 по странам Европы изменяются в достаточно широких пределах от 0,85 до 28,1 тонн CO_2-экв./чел. Примем в качестве опорного значения этого показателя среднее значение по странам Европы, равное $p_{1_0} = 8{,}8$ тонн CO_2-экв./чел. Аналогичным образом принимаем опорное значение по охраняемым территориям $p_{2_0} = 10{,}9$ % (диапазон изменения от 0,5 до 40,1 %), а долю сельскохозяйственных земель в общей площади земли – $p_{3_0} = 48{,}8$ % (диапазон изменения от 3,0 до 77,0 %). На основе приведенных данных получим опорную точку $M_0(p_{1_0}, p_{2_0}, p_{3_0})$, которая характеризует некоторый объект со среднестатистическими характеристиками.

Свяжем вероятность w со значениями переменных в массиве опытных данных, в результате чего будем иметь следующую регрессионную зависимость величины w от энтропии состояния системы:

$$\ln(w) = -1{,}804 + s; \quad s = 0{,}466 \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_{1_0}}\right) + 0{,}495 \cdot \ln\left(\frac{p_2}{p_{2_0}}\right) + 1{,}041 \cdot \ln\left(\frac{p_3}{p_{3_0}}\right). \quad (5.5)$$

Коэффициент корреляции зависимости (5.5) составил 0,91, результаты обработки данных приведены на рисунке 5.2. Исходные переменные относились к значениям $p_{1_0}, p_{2_0}, p_{3_0}$, которые соответствуют выбранному среднестатистическому опорному состоянию. Из приведенных данных видно, что феноменологические константы c_1, c_2, c_3 для изучаемого случая соответственно равны: $c_1 = 0{,}466$, $c_2 = 0{,}495$, $c_3 = 1{,}041$. Алгоритм подсчета вероятности состояния системы также является однозначным, поэтому всегда существует зависимость вероятности w от исходных переменных.

Таким образом, и в этом случае в пространстве состояний системы H^3 можно построить криволинейные координаты, которые определяют некоторое поле направлений, отражающее среднестатистические тенденции, связанные с экологическими изменениями во всем изучаемом классе объектов (среди стран Европы).

Из данных таблицы 5.4 видно, что страны Европы могут быть ранжированы по совокупности нескольких экологических показателей за счет определения потенциала каждой страны в пространстве переменных (p_1, p_2, p_3). Комплексная оценка осуществляется путем определения положения каждой страны в криволинейных координатах данного пространства с учетом среднестатистических тенденций развития всех стран. Оценка проводится относительно средних значений экологических показателей по отношению к опорной точке $M_0(p_{1_0}, p_{2_0}, p_{3_0})$. Ранги стран устанавливались по возрастанию степени воздействия стран на окружающую природную среду.

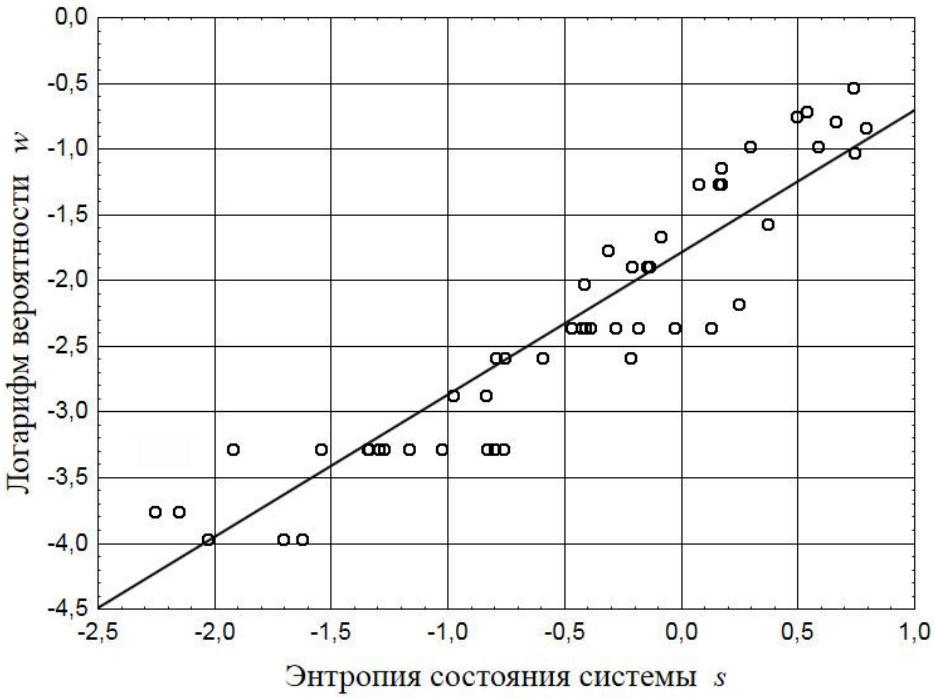

Рисунок 5.2. – Зависимость статистической вероятности состояния w от энтропии s для совместно наблюдаемых значений показателей p_1, p_2, p_3

Таким образом, с учетом вероятностной оценки совместных событий, связанных с одновременным наблюдением экологических показателей, можно проводить взаимное сравнение различных природно-антропогенных систем между собой на основе данных о состоянии и экологическом развитии этих систем.

Таблица 5.4. – Значения потенциала *P* для стран Европы относительно средних значений экологических показателей

Страны Европы	Потенциал страны *P*	Ранг страны	Страны Европы	Потенциал страны *P*	Ранг страны
Лихтенштейн	25,15	1	Украина	-0,80	27
Люксембург	22,64	2	Туркменистан	-0,99	28
Эстония	18,23	3	Латвия	-1,01	29
Германия	15,28	4	Словения	-1,17	30
Австрия	12,29	5	Исландия	-1,24	31
Польша	11,34	6	Литва	-1,41	32
Швейцария	10,88	7	Кипр	-1,52	33
Словакия	8,79	8	Румыния	-1,68	34
Монако	6,24	9	Швеция	-2,01	35
Чешская Республика	6,09	10	Беларусь	-2,11	36
Великобритания	5,89	11	Португалия	-2,21	37
Нидерланды	4,62	12	Азербайджан	-2,26	38
Ирландия	4,23	13	Хорватия	-2,30	39
Финляндия	2,65	14	Македония	-2,32	40
Дания	2,07	15	Армения	-2,36	41
Российская Федерация	1,90	16	Республика Молдова	-2,37	42
Казахстан	1,60	17	Узбекистан	-2,44	43
Бельгия	1,51	18	Мальта	-2,91	44
Италия	1,38	19	Андорра	-3,02	45
Греция	0,97	20	Турция	-3,22	46
Таджикистан	0,88	21	Сербия и Черногория	-3,26	47
Франция	0,81	22	Кыргызстан	-3,56	48
Испания	0,04	23	Грузия	-4,01	49
Венгрия	-0,20	24	Албания	-4,01	50
Болгария	-0,56	25	Босния и Герцеговина	-4,25	51
Норвегия	-0,77	26	Сан-Марино	-5,01	52

Данный метод комплексной оценки может быть применен к различным природно-антропогенным системам, например, странам, регионам, городам и природно-промышленным комплексам, а также к любой совокупности исходных экологических показателей.

Из приведенного примера видно, что методы комплексной оценки позволяют установить закономерности экологического развития природно-антропогенных систем и осуществить многопараметрическое ранжирование таких систем в пространстве нескольких переменных.

5.4 Стратегическое прогнозирование состояния и развития стран и их регионов по показателям человеческого развития

Использование предложенного метода комплексной оценки проиллюстрируем также на примере разработки методики оценки человеческого развития, альтернативной методике расчета индекса человеческого развития Программы развития ООН [38 – 40]. Для этой цели используем комплексные методы анализа стран мира [4, 5, 7, 122, 123].

В 2010 году методика ПРООН для расчета индекса человеческого развития была изменена [38]. Во-первых, изменены основные расчетные зависимости, которые построены исключительно экспертным путем. Во-вторых, в качестве атрибутивных переменных для расчета индекса стали использоваться следующие показатели: средняя продолжительность обучения p_1, лет; ожидаемая продолжительность обучения p_2, лет; валовый национальный доход (ВНД) на душу населения в пересчете по паритету покупательной способности в долларах США p_3; ожидаемая продолжительность жизни p_4, лет. Будем также считать данные величины атрибутивными переменными. Для решения задачи воспользуемся базами данных Докладов развития человека ПРООН за 2010 и 2014 годы [38 – 40], которые охватывают данные по странам мира с 2008 по 2013 годы.

На основе атрибутивных переменных p_1, p_2, p_3, p_4 сформируем четырехмерное пространство координат (p_1, p_2, p_3, p_4), в котором возможные состояния системы теоретически образуют некоторую область H^4, охватывающую все наблюдаемые точки баз данных. Область H^4

определена максимально наблюдаемыми значениями показателей p_1, p_2, p_3, p_4, которые входят в базы данных [38 – 40]. В этом случае состояние каждой страны в четырехмерном пространстве может быть представлено многомерной точкой $M(p_1, p_2, p_3, p_4)$, а процессы изменения состояния стран – соответствующими кривыми.

Рассмотрим сложное совместное событие одновременного наблюдения указанных выше четырех показателей и определим, что состояние каждой страны мира будет определяться данным наблюдаемым событием. Найдем статистическую вероятность этого события на основе данных, которые имеются в базах данных ПРООН [38 – 40]. В данном случае статистическая вероятность событий определялась путем разбиения всего пространства H^4 на четырехмерные параллелепипеды. Для этого каждая из переменных с наблюдаемыми значениями показателей p_1, p_2, p_3, p_4 в диапазоне минимального и максимального значений делилась на одинаковое количество интервалов группирования и, в образованных таким образом, параллелепипедах подсчитывалось количество находящихся опытных точек M_i. Относительные частоты находились делением числа этих точек на общее количество всех стран. Статистическая вероятность w подсчитывалась во всей группе объектов (169 стран мира). Данный алгоритм приведен в Приложении Б. Также, как и ранее, в качестве уравнений для комплексной оценки будем пользоваться зависимостями (3.4), (3.22) и (3.33).

Для поиска нелинейных связей между переменными воспользуемся методом пробит-анализа [125]. Свяжем полученную вероятность w с распределениями атрибутивных переменных в массиве опытных данных, в результате чего будем иметь следующую регрессионную зависимость вероятности от энтропии состояния системы:

$$\Pr ob = -3{,}071 + s; \qquad w = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \int_{-\infty}^{\Pr ob} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt; \tag{5.6}$$

$$s = 0{,}346 \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_{1_0}}\right) + 0{,}862 \cdot \ln\left(\frac{p_2}{p_{2_0}}\right) + 0{,}167 \cdot \ln\left(\frac{p_3}{p_{3_0}}\right) + 2{,}402 \cdot \ln\left(\frac{p_4}{p_{4_0}}\right).$$

Коэффициент корреляции зависимости (5.6) составил 0,98, результаты обработки данных приведены на рисунке 5.3. Атрибутивные переменные относились к значениям $p_{1_0}, p_{2_0}, p_{3_0}, p_{4_0}$, которые соответствуют выбранному опорному состоянию. В качестве опорного состояния были приняты показатели развития страны Нигер в 2008 году, как одной из самых слаборазвитых стран мира, которые, в частности, равны: $p_{1_0} = 1{,}4$ лет; $p_{2_0} = 4{,}3$ лет; $p_{3_0} = 675$ \$; $p_{4_0} = 52{,}5$ лет.

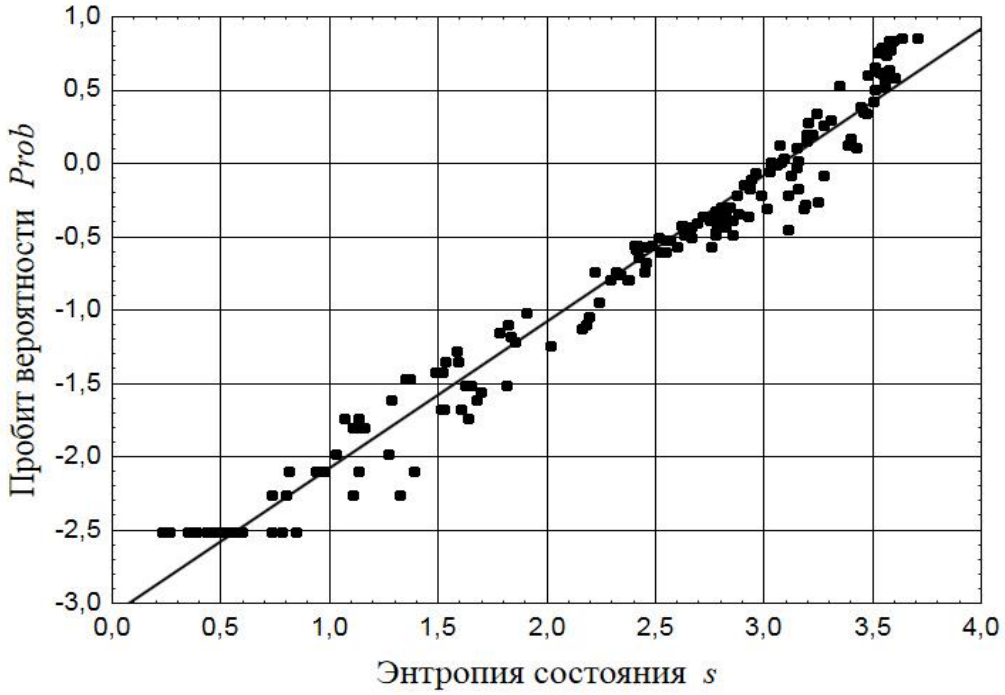

Рисунок 5.3. – Зависимость статистической вероятности состояния w от энтропии s для совместно наблюдаемых значений атрибутивных переменных p_1, p_2, p_3, p_4

Методы нелинейной регрессии позволяют находить различные уравнения связи между вероятностью w и величинами p_1, p_2, p_3, p_4. Как показано в третьей главе, обработка данных при установлении связей между вероятностью состояния w и энтропией s состояния системы может быть выполнена на основе различных зависимостей вида $w = \omega(s)$. Данные зависимости определяются с помощью нелинейных преобразований вероятности состояния системы в пробит-величины

$(\Pr ob)$ с использованием обратных функций эмпирических распределений и поиска линейных уравнений связей между $\Pr ob$ и энтропией s.

Например, логарифмическое уравнение связи с коэффициентом корреляции 0,89 имеет вид:

$$s = 0{,}796 \cdot \ln W; \quad W = \frac{w}{0{,}000858}; \tag{5.7}$$

$$s = 0{,}9751 \cdot \ln\left(\frac{\rho_1}{\rho_{1_0}}\right) + 1{,}4908 \cdot \ln\left(\frac{\rho_2}{\rho_{2_0}}\right) + 0{,}0196 \cdot \ln\left(\frac{\rho_3}{\rho_{3_0}}\right) + 3{,}3488 \cdot \ln\left(\frac{\rho_4}{\rho_{4_0}}\right).$$

Однако, при обработке данных зависимость (5.7) имеет существенно большую среднеквадратичную ошибку аппроксимации, нежели зависимость (5.6), несмотря на почти одинаковые коэффициенты корреляции. Уравнение (5.7) имеет вид уравнения Больцмана в статистической физике.

Если обратить внимание на полученную зависимость (5.6), то можно видеть, что в многомерной области H^4 возможно построение комплексного индекса состояния системы $T = T(p_1, p_2, p_3, p_4)$, который может стать основой шкалы для сравнения стран мира:

$$T = a \cdot \left(\frac{p_1}{p_{1_0}}\right)^{0{,}653} \left(\frac{p_2}{p_{2_0}}\right)^{0{,}929} \left(\frac{p_3}{p_{3_0}}\right)^{0{,}025} \left(\frac{p_4}{p_{4_0}}\right)^{2{,}258}, \tag{5.8}$$

где a – постоянная шкалирования, которая пока принимается равной единице. Данная постоянная дает возможность стандартизировать единицу измерения для величины T по отношению к опорной точке.

Значения индекса T в области H^4 образуют скалярное поле, с которым может быть связана некоторая система комплексной оценки состояния каждого объекта. Также видно, что параметры состояния каждого объекта соотносятся с параметрами опорного объекта, в данном случае, страны Нигер, исходя из уровня его развития в 2008 году. Таким образом, использование уравнения (5.8) позволяет построить систему оценки состояний объектов, своего рода некоторый аналог «температуры» применительно к странам мира. Зависимость (5.8) задает уравнение состояния применительно к странам мира. Также задание скалярного поля величины T дает возможность получить определенную среду

моделирования для решения задач, связанных с анализом развития стран мира. Однако, для однозначной оценки развития стран мира в пространстве H^4 одного задания скалярного поля величины T мало, необходимо также уметь оценивать вероятности состояния объектов. Поэтому, для построения системы оценки интенсивности процессов развития стран воспользуемся возможностью численного определения вероятности состояния объектов. С этой целью сделаем предположение, что в области H^4 процессы развития стран мира с течением времени описываются многомерными непрерывными кривыми, соединяющими между собой различные состояния. Естественно, что процессы развития некоторой страны, которые могут осуществляться между наблюдаемым состоянием M и любым другим возможным состоянием в области H^4, будут отличаться между собой по интенсивности взаимодействия объекта с глобальным социальным, экономическим, биосферным, информационным и другим окружением, т.е. с глобальной окружающей средой. Будем комплексно характеризовать взаимодействие объекта с окружающей средой при осуществлении процессов его развития с помощью оценки изменения вероятности состояния этого объекта при переходе из состояния 1 в состояние 2. Для этого мы должны иметь возможность оценивать вероятность состояния объекта в группе всех наблюдаемых объектов, причем данная вероятность должна быть функционально связана с некоторой ограниченной областью, куда попадает каждая страна в пространстве состояний H^4, а также характеризовать изменение состояния объекта в процессе его развития. То есть оценка вероятности должна быть привязана к каждой точке M_i. С этой целью использовался алгоритм с выделением четырехмерных параллелепипедов с вершинами, образованными опытными точками, и осуществлением подсчета числа точек, попавших в эти параллелепипеды (рис. 5.4).

Возможность оценки интенсивности процессов через изменение вероятности состояний и использование шкалы для сравнения состояний объектов на основе уравнения (5.8) позволяет установить феноменологические константы, которые характеризуют процессы развития для каждой страны мира. Также как и в третьей главе, постулируя для любого процесса развития страны l существование связи вида $dw = c_l \cdot dT$

между величинами w и T, можно найти величины c_l. Для процессов развития 169 стран в период с 2008 по 2013 годы результаты оценки представлены на рисунке 5.4 и в таблице 5.5.

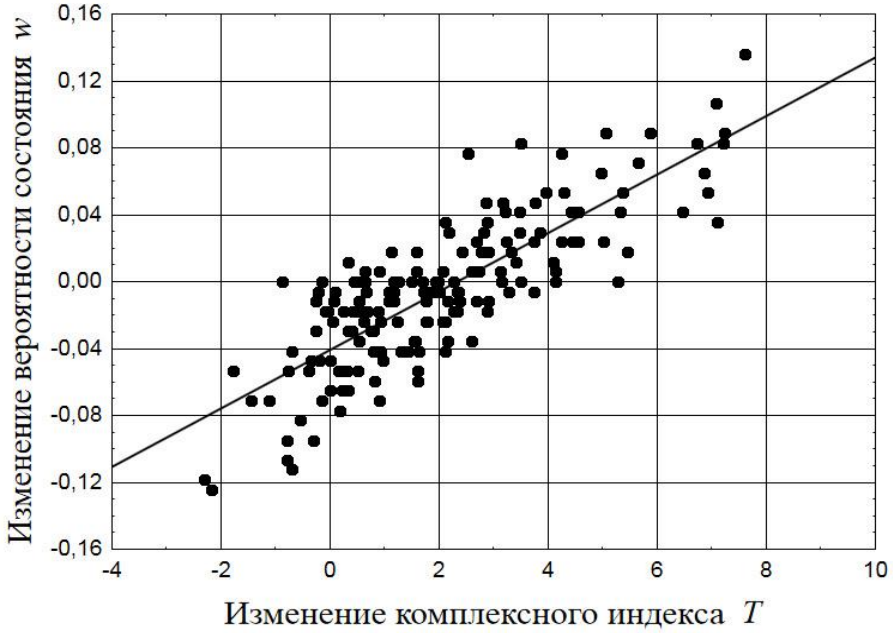

Рисунок 5.4. – Зависимость изменения вероятности состояния Δw от изменения индекса ΔT для стран мира в период с 2008 по 2013 годы

Регрессионная зависимость для величин Δw и ΔT на интервале времени $\Delta\tau = 5$ лет имеет вид:

$$\Delta w = -0{,}0423 + 0{,}0183 \cdot \Delta T. \qquad (5.9)$$

Коэффициент корреляции зависимости (5.9) составил 0,82.

В области H^4 зависимость изменения вероятности состояния Δw от изменения комплексного индекса ΔT можно определить для любого процесса развития. Например, найдем зависимость, связывающую эти величины $\Delta w = f(\Delta T)$, для гипотетического процесса l_{08-13}, характеризующего переход некоторой страны, например, Украины, из состояния, которое наблюдалось в 2008 году, к состоянию, в котором в 2013 году находилась каждая k-тая страна. Время перехода в новое состояние (время релаксации) в каждом конкретном случае будет иметь свое значение. Результаты анализа представлены на рисунке 5.5, а соответствующая зависимость с коэффициентом корреляции 0,99 имеет вид:

$$\Delta w = 0{,}0322 + 0{,}0194 \cdot \Delta T. \qquad (5.10)$$

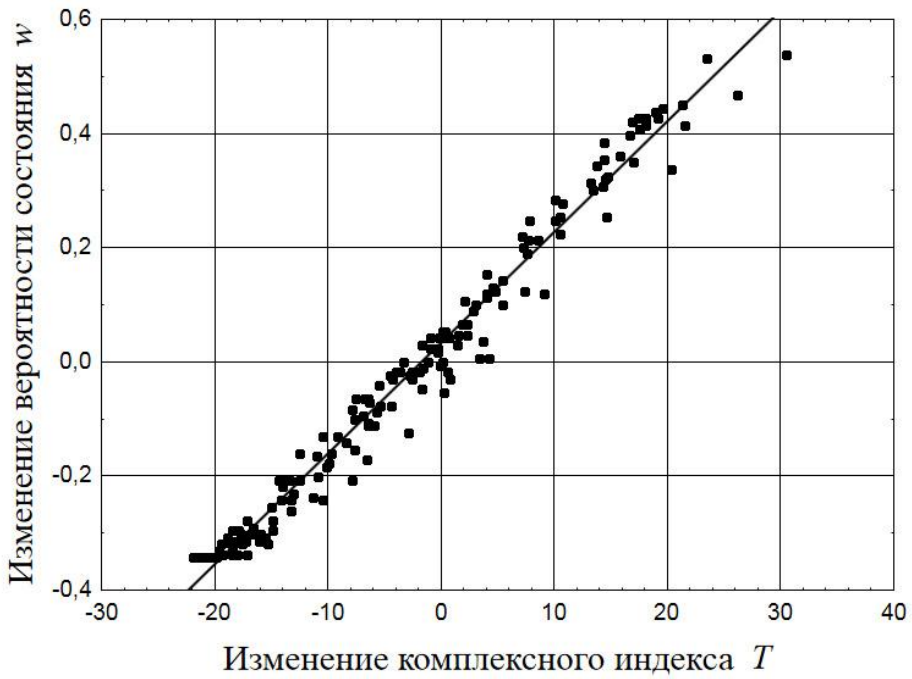

Рисунок 5.5. – Зависимость величины $\Delta w = w - 0{,}3491$ от изменения индекса $\Delta T = T - 23{,}52$ (в 2013 году для Украины $w_{ua} = 0{,}3491$ и $T_{ua} = 23{,}52$)

Таким образом, для всех стран мира и для любых процессов могут быть определены уравнения вида $\Delta w = a + b \cdot \Delta T$, из которых находятся феноменологические постоянные a и b, характеризующие процессы развития стран. При обработке для различных стран мира аналогичных спектров по 169 процессам получено, что коэффициент b имеет постоянное значение для всех стран, а разброс значений коэффициента a относительно не велик. Это указывает на то, что для обработки данных можно использовать ранее приведенную простую зависимость $dw = c_l \cdot dT$, где величина c_l определяет характер и направление процесса.

При известных величинах Δw и ΔT уравнение $dw = c_l \cdot dT$ для любой страны и для любого процесса ее развития $l_{08,13}$ может быть получено в виде:

$$\Delta w = c_{08-13} \cdot \Delta T \,. \tag{5.11}$$

Феноменологические величины c_{08-13} для процессов развития стран приведены в таблице 5.5.

Таблица 5.5. – Характеристики процессов развития стран по четырем атрибутивным показателям p_1, p_2, p_3, p_4

Страна	c_l	c_{08-13}^{ua}	c_{08-13}^{ru}
Норвегия	-0,0229	0,0227	0,0200
Швейцария	0,0126	0,0231	0,0198
США	-0,0025	0,0236	0,0200
Германия	0,0029	0,0227	0,0195
Канада	-0,0114	0,0238	0,0202
Сингапур	0,0150	0,0224	0,0183
Швеция	0,0001	0,0248	0,0208
Англия	0,0179	0,0245	0,0206
Гонконг	0,0047	0,0216	0,0178
Япония	-0,0443	0,0206	0,0175
Франция	-0,0134	0,0228	0,0190
Чехия	0,0085	0,0268	0,0218
Греция	-0,3033	0,0238	0,0192
Катар	0,0123	0,0288	0,0174
Эстония	-0,0025	0,0214	0,0168
Польша	0,0052	0,0281	0,0212
Литва	0,0000	0,0129	0,0107
Словакия	-0,0677	0,0318	0,0223
Венгрия	-0,0894	0,0277	0,0193
Латвия	-0,0330	0,0183	0,0128
Беларусь	0,0033	0,0096	0,0078
Румыния	0,1380	0,0332	0,0169
Россия	0,0052	0,0542	0,0052
Болгария	-0,0164	0,0309	0,0157
Турция	0,0115	-0,0443	0,0190
Казахстан	0,0158	0,0285	-0,0059
Азербайджан	0,1366	0,0116	0,0000
Бразилия	-0,0136	0,0074	0,0058
Грузия	0,0019	0,0018	0,0044
Украина	-0,0371	-0,0371	0,0000
Армения	-0,0102	0,0001	0,0062
Китай	0,0035	0,0000	0,0225
Египет	0,0023	0,0086	0,0123
Молдова	-4,6983	0,0190	0,0668
Узбекистан	-0,2855	0,0174	0,0458
Индия	-0,0067	0,0149	0,0192
Нигерия	-0,0109	0,0172	0,0209
Эфиопия	-0,0030	0,0175	0,0210
Нигер	0,0000	0,0157	0,0182

Здесь c_l – величина интенсивности для процессов развития стран в период с 2008 по 2013 годы; c_{08-13}^{ua}, c_{08-13}^{ru} – величины интенсивности перехода Украины и России из состояния 2008 года к состоянию, в котором в 2013 году находилась каждая *k*-тая страна.

Данные величины определены для случаев перехода России и Украины из состояний, которые наблюдались в 2008 году, к состоянию, в котором в 2013 году находилась каждая k-тая страна. Из данных видно, что значения величин c_{08-13} имеют не очень большой разброс.

Выполненные исследования позволяют устанавливать связи распределений вероятности для совместных событий одновременного наблюдения четырех атрибутивных показателей с распределениями вероятностей других событий. На рисунках 5.6 и 5.7 показаны зависимости вероятностей событий, связанных с младенческой смертностью и количеством интернет-пользователей в различных странах мира, от вероятности состояния системы w.

Особенностью предлагаемой методики является использование объективного подхода и отсутствие применения экспертных зависимостей для оценки. Зависимости для комплексной оценки основываются на определении функций состояния системы – энтропии и потенциала. Для рассматриваемого случая энтропия s и потенциал P определяются выражениями (3.22) и (3.23). Каждая страна в процессе своего развития будет занимать некоторое положение относительно этих криволинейных координат. Это позволяет объективно определить ранг страны среди множества других стран. Энтропия будет определять направление процесса развития страны в поле направлений развития системы в целом, потенциал – принадлежность точки некоторой поверхности уровня, ортогональной линиям энтропии, при условии определенной вероятности состояния системы (постоянной энтропии) [7].

На основе полученных данных, исходя из вероятностной оценки сложных совместных событий, связанных с наблюдением показателей p_1, p_2, p_3, p_4, были определены энтропия и потенциал развития для каждой страны мира. Результаты ранжирования стран мира приведены в таблице 5.6. К первым десяти странам, имевшим высокий уровень развития в 2013 году, относятся: Катар, Лихтенштейн, Кувейт, Сингапур, Бруней, Норвегия, Люксембург, ОАЭ, Швейцария и Гонконг. Видно, что из Большой двадцатки стран (G20) в списке нет ни одной страны, а из ЕС – только Люксембург. По темпам развития в 2008 – 2013 годах к десятке быстро развивающихся стран относятся: Катар, Кувейт, Сингапур, Бруней, Саудовская Аравия, Швейцария, Лихтенштейн, Люксембург, Гонконг и Исландия.

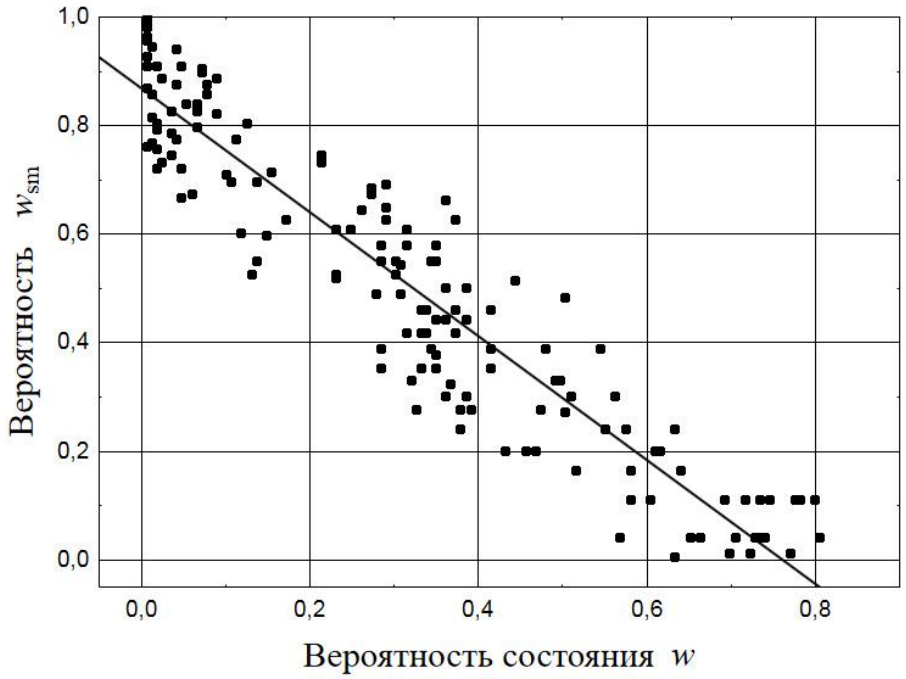

Рисунок 5.6. – Зависимость вероятности событий w_{sm}, связанных с младенческой смертностью в странах мира, от вероятности состояния w

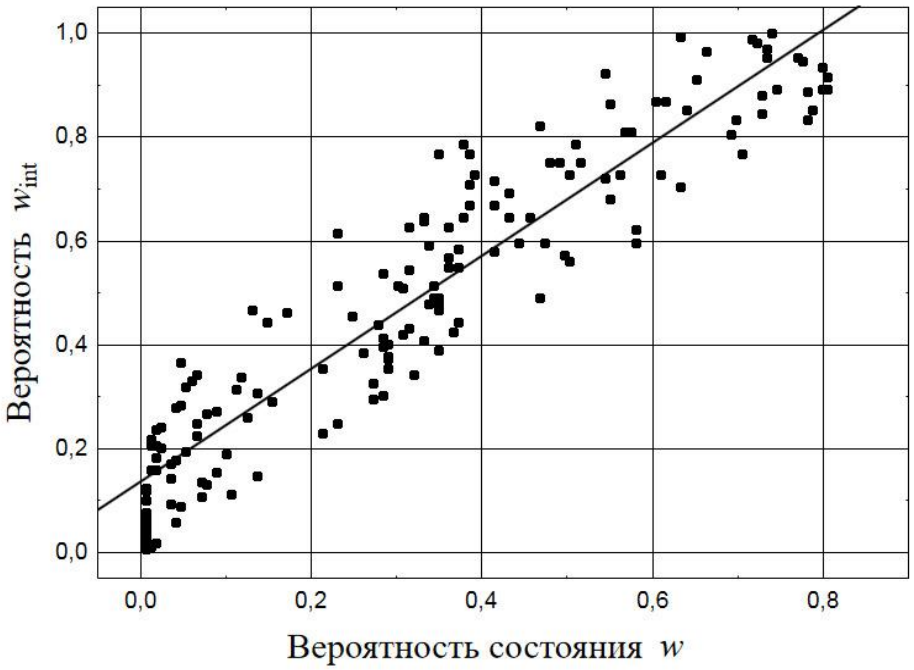

Рисунок 5.7. – Зависимость вероятности событий w_{int}, связанных с количеством интернет-пользователей в странах мира, от вероятности состояния w

Таблица 5.6. – Значения потенциала P, его изменение ΔP и рейтинги стран в процессах развития стран мира в 2008 – 2013 годах

Страны мира	Потенциал страны P (2013 г.)	Изменение потенциала ΔP (2008–2013 гг.)	Ранги стран согласно предложенной методики		Ранги стран по ИЧР согласно методике ПРООН (2013)
			уровень развития (2013)	темпы развития (2008 – 2013)	
Норвегия	365995	56065	6	11	1
Швейцария	259015	116708	9	6	3
США	245219	46445	11	13	5
Германия	166119	54351	14	12	6
Канада	157264	23242	18	26	8
Сингапур	469250	255069	4	3	9
Швеция	167274	44982	13	15	12
Исландия	110534	63424	25	10	13
Англия	109843	-485,4	26	165	14
Гонконг	245864	63685	10	9	15
Япония	121041	13151	23	41	17
Франция	120260	14557	24	38	20
Италия	95662	17025	28	33	26
Чехия	54018	7856	40	59	28
Греция	54522	-13679	39	167	29
Катар	1269241	704098	1	1	31
Эстония	49085	22596	43	27	33
Польша	41441	12999	49	43	35
Литва	50583	30832	42	18	35
Словакия	57580	15484	37	36	37
Венгрия	40482	13057	51	42	43
Латвия	44168	29103	45	20	48
Беларусь	**24179**	**9174**	**62**	**52**	**53**
Румыния	27282	12446	57	45	54
Россия	**45899**	**25014**	**44**	**24**	**57**
Болгария	21306	10146	66	50	58
Турция	30315	14329	55	39	69
Казахстан	**33911**	**24475**	**53**	**25**	**70**
Азербайджан	22215	15313	65	37	76
Бразилия	18266	8178	70	56	79
Грузия	4334	2101	103	99	79
Украина	**6115**	**2220**	**97**	**95**	**83**
Армения	5723	2961	99	90	87
Китай	11812	7084	80	62	91
Египет	9688	6584	86	63	110
Молдова	2317	1389	117	105	114
Узбекистан	2490	1595	115	104	116
Индия	2356	1380	116	106	135
Пакистан	1917	1295	121	109	146
Нигерия	2551	2153	114	98	152
Эфиопия	118,0	67,0	160	151	173
Нигер	28,6	28,2	165	161	187

К десяти странам, имевшим самый низкий уровень развития, относятся ЦАР, Бурунди, Малави, Либерия, Нигер, Мозамбик, Гвинея-Бисау, Гвинея, Того и Эфиопия. Все эти страны находятся в Африке. По темпам развития в 2008 – 2013 годах самыми отстающими странами были: Барбадос, Багамские Острова, Греция, Экваториальная Гвинея, Англия, Соломоновы острова, Малави, ЦАР, Нигер и Уганда.

Видно, что в списке присутствуют Англия и Греция, входящие в группу стран ЕС. Англия и Греция – это две единственные европейские страны, у которых в 2008 – 2013 годах произошло снижение удельного ВНД.

Россия в рейтинге по уровню развития в 2013 году занимала 44 место, в свою очередь: Украина – 97; Казахстан – 53; Белоруссия – 62 место. По темпам развития в 2008 – 2013 годах Россия находилась на 24 месте, Украина на 95, Казахстан на 25, а Белоруссия на 52 месте. За этот период Украина в темпах развития отставала от России и Казахстана, а также стран бывшего СССР. Более низкие темпы, чем у Украины наблюдались в Грузии, Узбекистане, Молдове, Кыргызстане и Таджикистане.

Рейтинги стран мира по уровню развития $R_{оон}$, определенные по методике расчета индекса человеческого развития ПРООН, существенно отличаются от аналогичного рейтинга R, рассчитанного по данной методике. Результаты сравнения приведены на рисунке 5.8.

Для большинства развитых стран методика ПРООН дает завышенные рейтинги уровня развития, а для многих развивающихся стран – заниженные. Среди стран, которые по потенциалу развития P попали в первую десятку, только Сингапур, Норвегия и Швейцария имеются в рейтинге Топ-10 Программы развития ООН.

Предложенная методика оценки развития стран может быть применена к любой совокупности исходных показателей, однако с увеличением числа показателей свыше $4-5$ резко возрастает трудоемкость и время расчетов, а также возникают проблемы с линейным преобразованием координат и получением в многомерном пространстве функций вида (5.6).

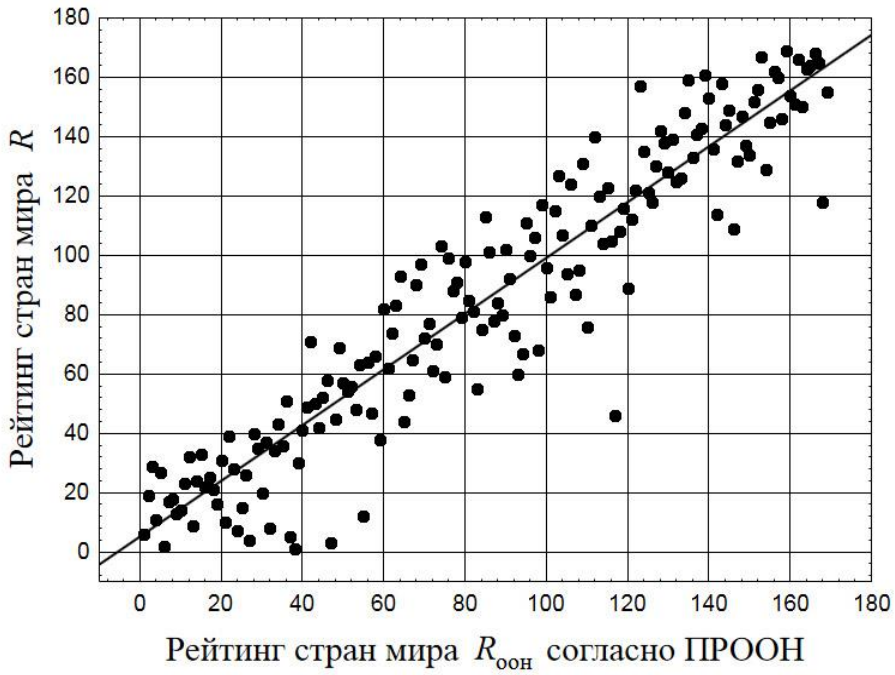

Рисунок 5.8. – Сравнение рейтингов стран мира по уровню развития по различным методикам оценки

Крайне важным фактором является также выбор наиболее обоснованных атрибутивных переменных, которые адекватно отражают состояние и развитие стран мира. Перечень атрибутивных показателей, предложенных Программой развития ООН, не является оптимальным и не отражает всей сложности проблемы анализа данных в этом случае.

Предложенные вероятностные методы комплексной оценки могут быть применены при решении задач стратегического прогнозирования. В глобалистике и регионалистике под стратегическим прогнозированием обычно понимают процесс разработки эмпирически или теоретически обоснованных прогнозов о состоянии объектов прогнозирования в будущем и возможных путях и сроках достижения этими объектами поставленных целей. При этом стратегическое прогнозирование выполняет две важные функции, связанные с описательной и предсказательной характеристикой объектов прогнозирования. В свою очередь, содержанием стратегического прогнозирования является разработка долгосрочных и среднесрочных прогнозов по определенным аспектам развития стран и регионов.

Одной из основных задач документа «Об основах стратегического планирования в Российской Федерации», который базируется на фундаментальном положении о взаимосвязи устойчивого развития государства и обеспечения национальной безопасности, является повышение качества прогнозов и комплексных оценок при планировании развития страны. Поэтому, создание новых методов оценки развития стран и регионов, а также их объективное ранжирование по комплексу показателей может способствовать решению проблемы разработки достоверных прогнозов на среднесрочную и долгосрочную перспективу.

Известно, что для анализа развития крупных территориальных образований используется различная статистическая информация, обобщающая сотни меняющихся с течением времени показателей. Оценка состояния и развития регионов на основе статистической информации осуществляется практически во всех странах, так как позволяет прогнозировать ключевые процессы изменения общества. Основой анализа является принцип, что при упреждающей стратегической оценке легче выявить и предотвратить негативные последствия для населения и окружающей природной среды на стадии принятия решений, чем их обнаружить и исправлять на стадии осуществления.

Данный метод позволяет также провести комплексную оценку уровня человеческого развития регионов России на основе определения вероятностей событий, отражающих процессы регионального развития.

Российский офис Программы развития ООН (ПРООН) периодически представляет Доклады о развитии человеческого потенциала в Российской Федерации. Последний Доклад, который вышел в 2013 году [90] является продолжением нескольких предыдущих национальных докладов [91], подготовленных российскими экспертами. По результатам последнего исследования город Москва признана самым благополучным регионом в России. В пять наиболее благополучных регионов вошли также Санкт-Петербург, Тюменская, Сахалинская и Белгородская область.

В докладе ПРООН по Индексу человеческого развития в регионах РФ 2013 года [90] представлены данные, рассчитанные по итогам 2010 года в соответствии с зависимостями (1.1) – (1.5). Согласно результатам исследования, в целом по регионам России ИЧР незначительно вырос по

сравнению с предыдущим годом. Рост отмечался в 71 регионе из 80. Быстрее всего возрастал ИЧР в Сахалинской области и Красноярском крае благодаря опережающему экономическому развитию.

В целом, региональные отличия регионов России по данным ИЧР почти не меняются с 2000 года. Считается, что чуть более 20% населения России живет в относительно благополучных регионах, около 10% – в регионах-аутсайдерах, а более двух третей – в регионах со средним уровнем человеческого развития. Результаты оценки человеческого развития регионов России по данным Российского офиса ПРООН приведены в таблице 5.7.

На основе предложенного метода проведем оценку человеческого развития регионов России.

В качестве атрибутивных переменных для расчета индекса используем следующие показатели: валовый внутренний продукт (ВВП) на душу населения в пересчете по паритету покупательной способности в долларах США p_1; ожидаемая продолжительность жизни p_2, лет; уровень грамотности населения p_3, %; доля охвата населения начальным, средним и высшим образованием p_4, %. Для решения задачи воспользуемся базами данных Докладов развития человека ПРООН для регионов России [90, 91].

Для поиска нелинейных связей между вероятностью и переменными вида (5.12) воспользуемся методом пробит-анализа. Свяжем полученную вероятность w с распределениями переменных p_1, p_2, p_3, p_4 в массиве статистических данных, в результате чего будем иметь следующую регрессионную зависимость вероятности от энтропии состояния системы:

$$\Pr ob = -5{,}766 + s; \qquad w = \frac{1}{\sqrt{2\cdot\pi}} \int_{-\infty}^{\Pr ob} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt;$$

$$s = 0{,}618\cdot\ln\left(\frac{p_1}{p_{1_0}}\right) + 8{,}968\cdot\ln\left(\frac{p_2}{p_{2_0}}\right) + 36{,}476\cdot\ln\left(\frac{p_3}{p_{3_0}}\right) + 3{,}028\cdot\ln\left(\frac{p_4}{p_{4_0}}\right). \quad (5.12)$$

Коэффициент корреляции зависимости (5.12) составил 0,90, результаты обработки данных приведены на рисунке 5.9. Из рисунка видно, что два города (Москва и Санкт-Петербург) выпадают из однородной группы регионов, что вполне естественно.

Таблица 5.7. – Значения потенциала P, его изменение ΔP и рейтинги регионов России в процессах развития в 2008 – 2010 годах

Регионы Российской Федерации	Потенциал развития P (2008)	Изменение потенциала ΔP (2008-2010)	Ранги регионов согласно предложенной методики		ИЧР по методике ПРООН (2008)	Ранги регионов по ИЧР (2008)
			уровень развития (2008)	темпы развития (2008-2010)		
1	2	3	4	5	6	7
Город Москва	280,92	18,51	2	28	0,929	1
Тюменская область	475,25	234,01	1	2	0,878	2
Город Санкт-Петербург	69,72	47,13	6	8	0,877	3
Республика Татарстан	72,54	36,39	5	11	0,848	4
Белгородская область	51,46	52,34	9	7	0,838	5
Томская область	47,22	34,94	14	12	0,834	6
Сахалинская область	165,45	358,49	3	1	0,829	7
Самарская область	36,42	12,64	23	40	0,817	8
Свердловская область	39,60	23,15	20	21	0,817	9
Липецкая область	53,11	6,99	8	65	0,816	10
Красноярский край	50,25	91,86	10	4	0,816	11
Республика Коми	59,27	60,05	7	6	0,816	12
Челябинская область	37,26	9,76	22	51	0,816	13
Республика Башкортостан	39,70	10,82	19	46	0,815	14
Омская область	34,78	17,99	24	29	0,815	15
Вологодская область	49,35	-3,10	12	80	0,814	16
Новосибирская область	25,37	10,53	34	48	0,814	17
Оренбургская область	48,27	28,85	13	16	0,813	18
Республика Саха-Якутия	47,03	60,27	15	5	0,813	19
Волгоградская область	27,54	7,76	32	59	0,811	20
Архангельская область	39,07	32,07	21	14	0,808	21
Краснодарский край	22,59	16,53	39	30	0,807	22
Московская область	46,51	11,78	16	44	0,806	23
Ярославская область	28,18	12,98	29	39	0,806	24
Удмуртская Республика	29,80	14,21	26	36	0,805	25
Пермский край	39,88	19,69	18	26	0,802	26
Саратовская область	19,04	15,88	41	34	0,801	27
Нижегородская область	27,64	19,70	31	25	0,801	28
Курская область	20,53	15,07	40	35	0,801	29
Ростовская область	16,21	8,23	48	55	0,801	30
Кемеровская область	49,72	34,22	11	13	0,799	31
Магаданская область	27,86	44,84	30	9	0,798	32
Орловская область	16,44	10,36	47	49	0,797	33
Астраханская область	22,78	5,61	38	71	0,797	34
Мурманская область	32,47	25,53	25	18	0,797	35
Чувашская Республика	17,48	4,18	45	74	0,797	36
Воронежская область	14,55	6,25	54	69	0,796	37

Продолжение таблицы 5.7

1	2	3	4	5	6	7
Республика Мордовия	15,32	6,75	50	68	0,794	38
Иркутская область	29,37	31,02	27	15	0,793	39
Калининградская область	26,09	16,46	33	31	0,792	40
Калужская область	23,61	20,53	36	23	0,791	41
Республика Северная Осетия	7,79	7,87	70	57	0,791	42
Республика Дагестан	5,98	6,97	74	66	0,788	43
Республика Хакасия	18,26	19,30	43	27	0,788	44
Пензенская область	12,02	6,18	64	70	0,786	45
Ульяновская область	14,42	12,24	55	41	0,786	46
Рязанская область	14,56	11,92	53	43	0,785	47
Хабаровский край	18,61	25,51	42	19	0,785	48
Тульская область	23,18	7,18	37	63	0,784	49
Тамбовская область	12,81	8,03	59	56	0,784	50
Республика Карелия	23,76	16,06	35	32	0,784	51
Карачаево-Черкесская Республика	7,09	2,24	71	78	0,783	52
Чукотский автономный округ	80,45	158,73	4	3	0,783	53
Ставропольский край	8,15	4,60	69	73	0,782	54
Ленинградская область	46,16	40,84	17	10	0,778	55
Новгородская область	29,03	21,99	28	22	0,778	56
Алтайский край	12,28	8,91	63	53	0,777	57
Камчатский край	14,18	19,89	57	24	0,776	58
Курганская область	12,66	8,58	62	54	0,776	59
Приморский край	13,55	28,32	58	17	0,775	60
Костромская область	14,68	10,72	51	47	0,775	61
Смоленская область	15,38	12,02	49	42	0,775	62
Кировская область	11,37	7,59	65	60	0,774	63
Тверская область	18,03	11,26	44	45	0,774	64
Республика Бурятия	14,28	7,35	56	61	0,771	65
Владимирская область	12,77	13,44	60	37	0,770	66
Брянская область	10,20	7,21	67	62	0,770	67
Кабардино-Балкарская Республика	4,04	7,10	78	64	0,769	68
Республика Марий Эл	10,94	10,29	66	50	0,769	69
Республика Адыгея	6,05	7,78	73	58	0,767	70
Чеченская Республика	1,93	0,89	79	79	0,766	71
Амурская область	16,54	24,85	46	20	0,765	72
Республика Калмыкия	4,89	4,02	76	75	0,763	73
Забайкальский край	14,63	13,36	52	38	0,762	74
Республика Ингушетия	0,10	2,96	80	77	0,759	75
Ивановская область	5,58	4,65	75	72	0,757	76
Псковская область	9,98	9,62	68	52	0,751	77
Еврейская автономная область	12,70	15,90	61	33	0,748	78
Республика Алтай	6,42	3,88	72	76	0,748	79
Республика Тыва	4,84	6,77	77	67	0,717	80

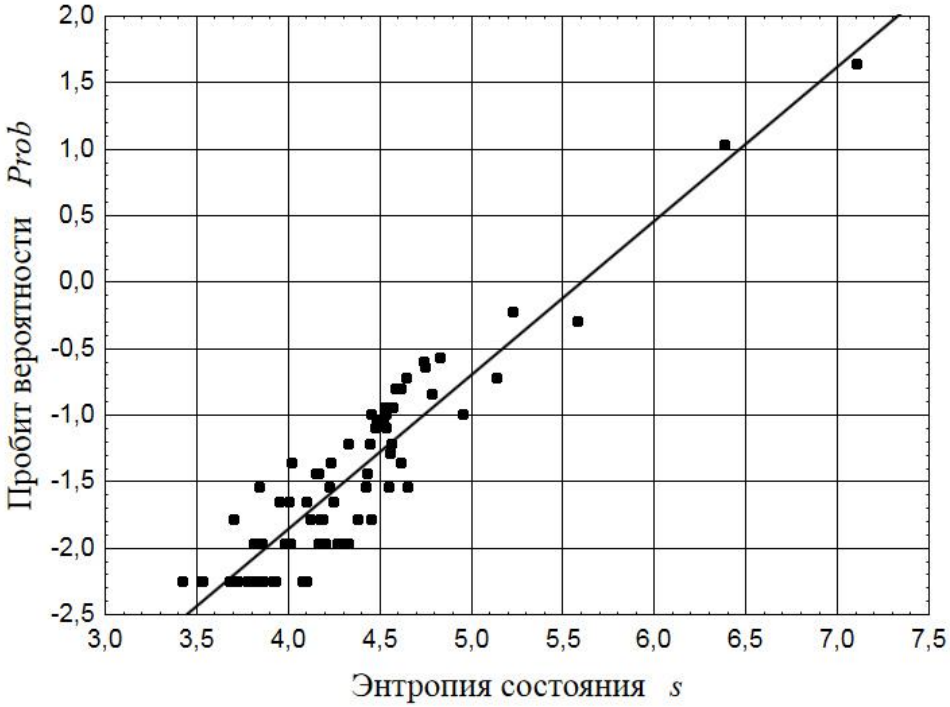

Рисунок 5.9. – Зависимость статистической вероятности состояния w от энтропии состояния системы s для распределения совместно наблюдаемых значений атрибутивных переменных p_1, p_2, p_3, p_4

Атрибутивные переменные выбирались такими же, как и в методике ПРООН до 2010 года, и относились к значениям $p_{1_0}, p_{2_0}, p_{3_0}, p_{4_0}$, в качестве которых были приняты минимальные показатели развития регионов, в частности, равные: $p_{1_0} = 2882$ \$; $p_{2_0} = 59{,}65$ лет; $p_{3_0} = 56{,}0$ %; $p_{4_0} = 46{,}7$ %.

На основе полученных данных, исходя из вероятностной оценки совместных событий, связанных с наблюдением атрибутивных показателей p_1, p_2, p_3, p_4, были определены энтропия и потенциал развития для каждого региона России в 2008 и 2010 годах. Результаты ранжирования по уровню и темпам развития для данного случая приведены в таблице 5.7.

К первым пяти регионам, имевшим самый высокий уровень развития в 2010 году, относятся: Тюменская область, город Москва, Сахалинская область, Чукотский автономный округ и Республика Татарстан. Видно, что от первых трех регионов, потенциал развития которых больше $P = 150$, остальные регионы отставали по развитию почти в два и более раза. В

среднем по потенциалу развития отношение в уровнях развития наиболее и наименее развитых регионов достигло 70:1. По темпам развития в период 2008 – 2010 годов к быстро развивающимся регионам относятся: Сахалинская и Тюменская области, Чукотский автономный округ, Красноярский край и Республика Саха-Якутия.

К пяти регионам, имевшим самый низкий уровень развития, относятся Республика Ингушетия, Чеченская и Кабардино-Балкарская Республики, а также Республики Тыва и Калмыкия. По темпам развития в 2008 – 2010 годах самыми отстающими регионами считаются: Вологодская область, Чеченская и Карачаево-Черкесская Республики, а также Республики Ингушетия и Алтай.

Города Москва и Санкт-Петербург по темпам развития в 2008 – 2010 годах занимали соответственно 28 и 8 место. За этот период самые высокие темпы развития, превышающие средние темпы развития всех остальных регионов в 6 – 10 раз по изменению потенциала ΔP, наблюдались в Сахалинской и Тюменской областях, а также в Чукотском автономном округе.

Рейтинги регионов по уровню развития, определенные по методике расчета индекса человеческого развития ПРООН, отличаются от аналогичного рейтинга, рассчитанного на основе данного подхода (табл. 5.7).

Проблема комплексной оценки непосредственно связана с совершенствованием методик рейтинговых оценок и ранжирования систем по совокупности показателей и разработкой прогнозов на среднесрочную и долгосрочную перспективу при стратегическом планировании. Сегодня в открытом доступе имеется информация о более чем 30 индексах и свыше 20 рейтингах развития стран, регионов и городов. Наиболее широко известны среди них: индекс развития человеческого потенциала (Human Development Index); индексы и рейтинги демократии (Freedom House, Economist Intelligence Unit); индекс ведения бизнеса Всемирного Банка (Doing Business); индекс и рейтинг благополучия стран мира (Happy Planet Index) и др. [17, 38 – 40, 75, 114, 131, 143]. Оценка указанных индексов основывается на разнообразных экспертных методиках, причем часто методические принципы расчетов международными организациями и агентствами не раскрываются.

Как видно из приведенного выше материала для определения индексов и оценки рейтингов сложных систем можно предлагать универсальную прикладную методику.

Например, проиллюстрируем возможности предложенных методов на примере разработки методики, которая является альтернативой известной методике расчета Всемирного индекса счастья [75]. Данный индекс (Happy Planet Index) представляет собой оценку, отражающую благосостояние людей и состояние окружающей среды в разных странах мира. Индекс предложен исследовательским центром New Economics Foundation (NEF) в 2006 году.

В методике NEF в качестве атрибутивных переменных для расчета индекса используются следующие показатели: средняя продолжительность жизни p_1, лет; показатель субъективной удовлетворенности жизнью людьми p_2, бал; показатель экологического следа p_3, gha/capita. Для решения поставленной задачи воспользуемся базами данных центра NEF [75]. С учетом вероятностной оценки совместных событий, связанных с наблюдением показателей p_1, p_2, p_3, были построены вероятностные модели благополучия стран и определены ранги стран мира. Соответствующая модель получена в виде пробит-зависимости величины вероятности совместных событий наблюдения показателей p_1, p_2, p_3 от энтропии состояния системы:

$$w = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \int_{-\infty}^{\Pr ob} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt; \qquad \Pr ob = -2{,}205 + s$$

$$s = 0{,}964 \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_{1_0}}\right) + 2{,}032 \cdot \ln\left(\frac{p_2}{p_{2_0}}\right) + 0{,}499 \cdot \ln\left(\frac{p_3}{p_{3_0}}\right). \qquad (5.13)$$

Коэффициент корреляции зависимости (5.13) составил 0,983, результаты обработки данных для 146 стран мира приведены в таблице 5.8 и на рисунке 5.10. Атрибутивные показатели относились к значениям величин $p_{1_0}, p_{2_0}, p_{3_0}$, которые соответствуют выбранной опорной точке – состоянию страны Чад [75].

Таблица 5.8. – Значения потенциала *P* и рейтинги стран по показателям благополучия

Страны мира	Потенциал страны *P* (2012 г.)	Индекс счастья HPI (2012 г.)	Ранги стран по	
			HPI (2012 г.)	предложенной методике (2012 г.)
Коста-Рика	11,635	48,2	1	51
Вьетнам	6,555	46,0	2	80
Ямайка	6,486	42,4	3	81
Индонезия	4,322	42,2	5	96
Бангладеш	2,713	41,2	8	108
Панама	11,579	40,1	9	52
Куба	9,709	39,6	10	61
Израиль	18,630	39,5	11	34
Венесуэла	11,240	38,8	12	54
Никарагуа	6,346	38,6	13	82
Индия	1,915	34,0	34	112
Молдова	6,950	33,0	36	76
Англия	21,194	31,7	39	23
Таджикистан	2,040	31,4	41	111
Германия	20,773	31,2	43	25
Швеция	27,986	30,8	45	13
Франция	22,663	30,5	47	18
Япония	19,432	30,4	48	29
Италия	20,449	29,5	51	26
Узбекистан	4,086	28,0	56	98
Канада	32,262	27,8	58	6
Испания	21,223	27,4	62	22
Китай	7,031	27,1	65	74
Австралия	34,582	26,3	69	4
Словакия	19,292	25,0	75	31
Исландия	33,134	24,7	80	5
Сербия	9,405	24,3	82	62
Румыния	9,782	24,2	84	60
Словения	23,342	24,2	85	17
Беларусь	**14,220**	**23,3**	**90**	**45**
Замбия	-0,726	23,3	91	138
Украина	**9,898**	**23,0**	**92**	**58**
Бельгия	36,918	22,7	95	1
Азербайджан	5,021	22,1	101	93
США	36,914	21,9	104	2
Афганистан	-1,571	20,4	112	145
Эстония	18,706	20,1	114	33
Россия	**15,163**	**20,0**	**114**	**41**
Казахстан	**12,648**	**19,7**	**117**	**49**
Латвия	14,609	19,6	118	44
Болгария	12,580	18,1	123	50
Конго	-0,011	17,8	124	132
Ангола	-1,119	17,0	127	143
Танзания	0,409	15,0	138	123
Нигер	2,636	11,8	148	109
Чад	0,000	10,0	151	131

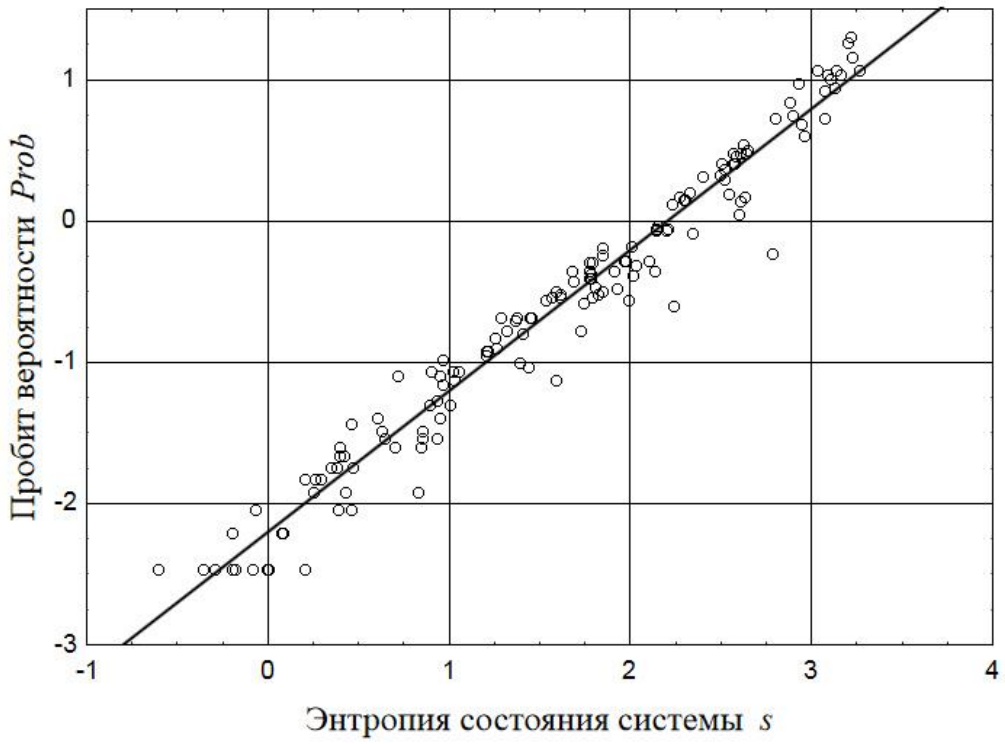

Рисунок 5.10. – Зависимость вероятности состояния w от энтропии состояния системы s для совместно наблюдаемых показателей p_1, p_2, p_3

В 2012 году к первым пяти странам, имевшим самое высокое значение в оценке благополучия страны, относятся: Бельгия, США, Тринидад и Тобаго, Австралия и Исландия. К пяти странам, имевшим самое низкое значение, относятся Сьерра-Леоне, Ангола, Бурунди, Афганистан и Конго (ДРК).

Полученные данные отличаются от оценок, которые даются центром NEF и при которых Всемирный индекс счастья характеризуется завышением веса показателя удовлетворенности жизнью. В методе, предложенном в монографии, ранги стран устанавливаются исходя из оценки вероятности совместных событий, связанных с наблюдением всех трех показателей благополучия стран.

Таким образом, результаты работы позволяют выйти на создание новых прогностических и рейтинговых систем по оценке развития стран, регионов и городов мира, которые на основе универсальной методики комплексной оценки дают возможность определять рейтинги стран по совокупности показателей. Такая система должна интегрировать данные о развитии стран и городов мира от 25 – 30 международных организаций и

определять 10 – 15 известных индексов и рейтингов по различным аспектам развития. Это позволит предложить новую систему информационно-аналитической поддержки принятия решений в области глобалистики и урбанистики.

Таким образом, на примерах показано, что при достаточном объеме опытных данных возможно построение феноменологических моделей для некоторых классов социально-экономических систем, в частности городов, регионов и стран. Практический опыт применения таких моделей в термодинамике и физике указывает на большие возможности, связанные с описанием и прогнозированием развития многих сложных систем в естествознании. Все это позволяет в прогнозных исследованиях применить объективный подход, отличающийся использованием методов, которые не зависят от воли и желаний субъекта, обеспечивают формализацию научной задачи в области предмета исследования и применяют адекватные модели для описания закономерностей. Важным является также возможность формирования обширной эмпирической базы для получения феноменологических описаний процессов и использование инструментов и средств для опытной проверки научных фактов на практике. Такой подход позволяет разработать принципиально новое математическое обеспечение для прогностических систем.

Предложенный метод комплексной оценки, основанный на феноменологических подходах описания структурированных данных и учете закономерностей развития объектов прогнозирования, позволяет строить модели описания данных различной точности, в том числе и очень высокой, независимо от природы изучаемых объектов. Континуальный принцип представления количественной информации и вероятностные методы оценки значимых событий отличаются определенной универсальностью и дают возможности для описания закономерностей поведения объектов, если информация о них представляется в структурированным виде «объекты-показатели-время».

Данный метод может быть использован при изучении групповых особенностей развития и поведения объектов социально-экономической и общественной природы. Например, при изучении тенденций развития стран, регионов, городов и других государственных и общественных

образований, при оценке особенностей и уровня налоговых поступлений в группах однородных субъектов налогообложения, при изучении поведения социальных групп и различных категорий людей, исходя из анализа однородных значимых событий и среднестатистических особенностей и т.д.

Приведенные практические примеры создания моделей описания данных для оценки состояния и развития стран и регионов указывают на достаточную теоретическую проработку предлагаемых прогностических методов.

5.5 Вероятностные модели биоразнообразия и комплексная оценка видов

Одна из важных задач системного анализа связана с систематизацией и комплексной оценкой биологических видов. Биоразнообразие представляет собой уникальную особенность живой природы, которая связана с возникновением структурной сложности и многообразия экологических систем. Именно биоразнообразие является основой существования всего живого на нашей планете. Уровень разнообразия как внутри каждого вида, так и в рамках всей биосферы признан в биологии одним из главных показателей жизнеспособности живой природы – это основа эволюции жизненных форм. Снижение видового и генетического разнообразия ставит под угрозу развитие форм жизни на Земле [28, 109, 110, 134, 142].

Оценки биологического разнообразия Земли впервые были предприняты биогеографами, которые в XVIII–XIX веках разработали схемы ботанико-географического и зоогеографического разделения поверхности нашей планеты по степени своеобразия флоры и фауны. В XX веке такие же схемы были составлены не только для флоры и фауны, но и для сообществ растений, животных, биогеоценозов. Ученые отмечают, что всего на нашей планете обитает до 100 млн. видов, однако более реальным числом оценки глобального биоразнообразия считается 14 миллионов видов [118, 135]. В то же время данные о количестве описанных представителей всех пяти основных царств на Земле составляют лишь 1,75

млн. видов, т.е. менее 15%. Эти материалы обобщены WCMC (World Conservation Monitoring Centre, http://www.unep-wcmc.org/) – Всемирным центром мониторинга биоразнообразия в Кембридже (Великобритания) и постоянно уточняются [135]. Кроме того, на нашей планете идет постоянный процесс появления и вымирания видов, подвидов и форм [109, 135, 139]. Вымирание – естественный процесс – считается, что более 99% когда-либо существовавших видов вымерли [139]. Сегодня виды исчезают в 100 – 1000 раз быстрее, чем до существования человека, и исчезновение видов, находящихся в данный момент под угрозой, может значительно увеличить эти потери [128]. В свою очередь, ускорение исчезновения видов может оказать негативное влияние на жизнеспособность всей живой природы Земли. Поэтому оценка биоразнообразия имеет большое значение, так как позволяет контролировать сохранение генетического потенциала, дает представление о состоянии экосистем на определенной территории, позволяет изучить тенденции в изменении биоценозов, а также установить факторы, угрожающие разнообразию [28].

На сегодняшний день проблема биоразнообразия относится к тем областям научного знания, которые опираются преимущественно на описательные методы. Несмотря на то, что имеется множество самых разных моделей и количественных оценок биоразнообразия, обобщающая теория данного явления отсутствует, а связь существующих моделей биоразнообразия с данными наблюдений пока не достаточна. Развитие биологических наук получило качественный скачок после формирования основ систематики животного и растительного мира – науки о разнообразии биологических организмов, о взаимоотношениях и родственных связях между их различными группами (таксонами). Однако биосистематика дает качественное описание и общую логическую классификацию видов, при этом основополагающие признаки, принятые при классификации, слабо учитывают количественные характеристики видов [71, 141, 146].

Целью данного раздела является изучение закономерностей взаимосвязи биологических показателей и ареалов видов животных, позволяющих на основе оценки событий наблюдения различных показателей разработать вероятностные модели биоразнообразия.

Развитие методологии биоразнообразия с учетом биологической систематики может начаться с создания структурированных баз количественных данных, которые несут информацию об основных показателях видов и характеристиках их распространения в природе, а также об условиях, в которых эти виды существуют. В последнее время подобные базы данных, которые охватывают тысячи видов и десятки показателей и характеристик видов, начинают создаваться и выставляться в открытом доступе (например, [29, 120]). Также уже созданы архивы повторного анализа климатических данных [121], которые охватывают территорию всей планеты и могут характеризовать условия распространения видов. Однако, базы данных о глобальном распространении видов недостаточно развиты. Объединение биологических и климатических баз данных позволит создать эмпирическую основу для поиска закономерностей и разработки теории биоразнообразия. При этом видны две задачи моделирования, связанные с моделями состояний видов. Первая задача посвящена разработке вероятностных моделей для оценки событий, характеризующих (по совокупности показателей) наблюдаемость конкретных видов среди множества других видов. Вторая задача связана с изучением распространения видов на планете с учетом условий окружающей среды.

Состояние исследований в области оценки биоразнообразия

Первые данные исследований, направленные на оценку биологического разнообразия, были опубликованы еще в начале второй половины XX века. С тех пор количество исследований в этой области значительно увеличилось, много внимания стало уделяться созданию методов изучения и построения моделей биоразнообразия, комплексной оценке состояния и распространения видов, разработке и использованию различных индексов, мер и индикаторов биоразнообразия. Анализ исследований по количественной оценке биоразнообразия выполнен в известных работах [84, 92, 96, 115]. Авторы отмечают, что в этой области имеется целый ряд методологических проблем:

- существующие методы оценки биоразнообразия в значительной мере некорректны, в первую очередь потому, что никак не учитываются морфологическое, функциональное, экологическое сходство/различие

между самими видами, которое определяется характерными показателями этих видов;

- индексы разнообразия часто основываются на экологически сомнительных концепциях: обычно в качестве эталона принимается экосистема с равными обилиями всех видов, что не вполне соответствует структуре реальных природных сообществ (другими словами – события, связанные с распространением видов, равновозможны);
- модели разнообразия пока основаны на достаточно частных и узких гипотезах и не могут служить фундаментом для формально строгой теории оценки биоразнообразия;
- приходится констатировать, что со времен Р. Уиттекера, заложившего вербальную основу понятий разнообразия для совокупности местообитаний, сколько-нибудь строгих методов количественной оценки разнообразия до настоящего времени не разработано;
- множество комплексных индексов и мер биоразнообразия построены с использованием гипотетических и экспертных подходов, которые не несут в своей основе фундаментальных закономерностей и не используют естественнонаучные методы при анализе и описании данных.

Для того, чтобы оценить биологические особенности видов по комплексу показателей необходима система критериев, которые, скорее всего, будут иметь вероятностный характер. Ряд авторов считает, что наиболее важной характеристикой многообразия является показатель выравненности (evenness) большого количества (обилия) видов, который отражает структуру экологического сообщества и показывает отсутствие доминантных видов [28, 88, 115]. Считается, что экологическая система имеет высокое качество с точки зрения биоразнообразия, если она отличается большим количеством видов и высоким показателем выравненности [28, 88]. Если вникнуть в суть понятий обилия видов и выравненности обилия видов, то экологическая система, отличающаяся по мнению ряда ученых богатым видовым разнообразием, должна удовлетворять следующим условиям:

- иметь высокий показатель обилия видов (количество видов на единице территории);

- отличаться равномерными вероятностными распределениями количества особей каждого вида;
- иметь близкие уровни плотности распределения вероятности для каждого вида.

Вопрос о том, действительно ли такая экологическая система оптимальна с точки зрения биологической эволюции, является крайне дискуссионным. Однако она может быть принята в качестве базовой (идеальной) модели, позволяющей сравнивать различные экосистемы по отношению к ней по критериям биоразнообразия. Принятие такой гипотезы возможно в случае, если будут построены вероятностные модели биологического разнообразия для таксонометрических групп – отрядов, семейств и т.д.

Следует отметить, что теоретические работы комплексной оценки в области биоразнообразия и экологических наук часто сводятся к гипотезам и обобщениям, оторванным от реальной статистической базы и систематического изучения опытных данных. Как следствие, адекватных моделей биоразнообразия и комплексных оценок состояния и распространения видов очень мало. По утверждению Розенберга Г.В. и Шитикова В.К. [96] «за последние 30 лет не появилось ни одной сколько-нибудь заметной публикации, вносящей что-то новое в основные концепции и фундаментальные законы экологии».

Сегодня поиску системообразующих факторов и формулировке общесистемных принципов моделирования объектов и явлений различной природы уделяется значительное внимание. Это направление в моделировании сложных систем связано с системным анализом и прикладной теорией систем. Последние исследования в этой области связаны с вероятностными описаниями систем, созданием теоретических методов и математического аппарата системной динамики. Работы Р. Уиттекера, Дж. Форрестера, П. Анохина и др. [15, 110, 112] внесли значительный вклад в технологию прикладного компьютерного и математического моделирования сложных социально-экономических систем, построение моделей биологических и экологических систем. Данное направление моделирования систем связано с использованием естественнонаучных методов в описании живой природы. Однако на

современном этапе развития науки следует признать, что в области биоразнообразия не существует фундаментальной теории, которая бы характеризовала состояние и распространение биологических видов. Попытки построения такой теории уже предпринимались. Еще в 30-х годах прошлого столетия известным русским ученым В.А. Костицыным концептуально был предложен подход, который позволяет построить модель распространения видов на Земле для оценки устойчивости жизни [64]. В связи с тем, что в то время невозможно было реализовать информационные модели, которые охватывают большой объем количественных и графических данных, эта идея так и осталась нереализованной. Модели распространения видов являются одним из основных инструментов построения эволюционной теории развития жизни на Земле. Основная проблема в этой области – как построить информационные ресурсы, позволяющие представить данные о биологических показателях и ареалах десятков тысяч видов, и увязать эти данные с глобальной климатической информацией, имеющей объемы от 2 до 15 терабайт [121]. Очевидно, что без использования информационных технологий указанная задача решена быть не может.

В области оценки биоразнообразия при изучении процессов и объектов исследователь оперирует массивами данных, содержащими десятки показателей и индикаторов. В настоящее время имеется ряд работ, направленных на стандартизацию показателей и индикаторов биоразнообразия для комплексной оценки состояния и распространения видов и применения статистических методов при изучении данных [99, 137, 151].

В области биоразнообразия накоплены большие базы данных, однако они в своей массе пока плохо структурированы. Тем не менее, данная информация сегодня уже вполне позволяет поставить задачу построения событийных моделей описания видов животных и оценки вероятности их распространения на Земле, исходя из комплексной оценки показателей, характеризующих морфологические и физиологические особенности видов. Установление закономерностей биоразнообразия даст возможность развивать практику использования в исследованиях экологических

процессов и явлений естественнонаучных методов, основанных на вероятностных подходах анализа и описания опытных данных.

Принципы построения вероятностных моделей в области биоразнообразия.

Пока в экологии методов количественной оценки биоразнообразия, которые бы не являлись в своей основе субъективными, практически не существует. Как показывают исследования, оценка биоразнообразия путем использования различных индексов часто приводит к противоречивым выводам, которые являются следствием субъективных представлений исследователей [115].

Сегодня в области биоразнообразия приоритетным считается изучение структурных особенностей сообществ в конкретных природно-климатических условиях с учетом их видового состава, численности, продолжительности жизни и других параметров. Без обобщения множества данных, характеризующих биоразнообразие, невозможно установить закономерности эволюции биологической жизни на Земле.

Для того, чтобы создать глобальные модели биологического разнообразия, необходимо отработать методические принципы исследования. Очевидно, что построение таких моделей невозможно без предварительной разработки моделей (уравнений) состояния биологических видов, которые бы характеризовали взаимосвязь биологических параметров организмов, а также моделей распространения видов, обобщающих информацию об ареалах видов на планете. Такие модели следует основывать на вероятностных подходах. Отработку моделей можно выполнить на нескольких тестовых примерах применительно к крупным таксонам животных и растений. Одновременно необходимо проводить работы по созданию структурированных баз данных биологических видов и увязке их с глобальными климатическими базами данных. Исходя из этого, актуальным является разработка геоинформационных моделей биоразнообразия, которые были бы основаны на учете и представлении ареалов видов, а также установление вероятностных закономерностей распространения видов с учетом их показателей [54, 151].

Основные принципы применения вероятностных методов при комплексной оценке биоразнообразия могут быть сформулированы в виде:

- существующая в базах данных статистическая информация о физиологических и морфологических показателях и ареалах видов может быть представлена в виде событий, связанных с наблюдением одного или нескольких показателей, для которых могут быть определены вероятности событий;
- исходя из этого поиск связей и закономерностей в массиве биологических данных, также, как и в предыдущих рассматриваемых случаях, может осуществляться не между показателями и ареалами видов, а между вероятностями событий наблюдения этих величин. При этом факт наблюдения одного показателя можно рассматривать как простое событие, а факт наблюдения нескольких показателей как совместное событие;
- статистические вероятности для простых и совместных событий могут быть найдены эмпирически с использованием различных алгоритмов сортировки, группировки и подсчета частот благоприятных событий в общей выборке всех наблюдений, характеризующих определенную группу видов;
- установление связи вероятностей событий с показателями и ареалами видов может быть осуществлено с использованием вероятностных методов пробит-анализа, широко применяемых при оценке вероятностей событий;
- вероятностные модели взаимосвязи показателей и ареалов видов могут быть установлены для конкретных групп видов. Статистическая оценка проводится в многомерном вероятностном пространстве путем разработки пробит-моделей вида «вероятности событий – логарифмы показателей»;
- предполагается, что для различных групп биологических видов может быть построено множество подобных вероятностных моделей, которые позволят разработать уравнения состояний для различных групп таксонов и установить закономерности биоразнообразия, исходя из связи различных событий, характеризующих сами виды, ареалы видов и условия окружающей среды.

Таким образом, для комплексной оценки биологических видов предлагается тот же методологический подход, что и при комплексной оценке социально-экономических и природно-антропогенных систем.

Для реализации сформулированных методических подходов были использованы массивы информации для мышеобразных, белкообразных, отряда приматов и всех позвоночных животных в целом. Для этих групп существует обширная информация в виде глобальных баз. Кроме того, использовались данные по биологическим видам из базы данных AnAge [120], а также известные базы данных по биоразнообразию [19, 29, 118] и др.

Подотряд мышеобразных отряда грызунов является одной из самых крупных таксономических единиц среди групп млекопитающих, он включает более 1 000 видов 10 существующих семейств и 3 вымерших. Представители данного подотряда населяют все природные зоны Земли. Собранная база данных мышеобразных включала информацию по 237 видам для 20 биологических показателей видов и их ареалов. Подотряд мышеобразных удобен как объект моделирования для анализа разнообразия и оценки условий обитания животных. Жизненные популяции грызунов являются индикатором состояния окружающей среды. Мышеобразные представляют интерес в эпидемиологических исследованиях и занимают важное место в цепях питания.

Белкообразные по оценкам специалистов включают в себя около 400 видов различных грызунов [118]. Данная группа животных хорошо приспосабливается к разным условиям жизни и освоила почти все климатические зоны Земли. Собранная база данных белкообразных содержала информацию о 90 видах, их показателях и ареалах. Подотряд белкообразные использован в связи с тем, что они имеют обширные области распространения и составляют самый древний подотряд грызунов.

Представители отряда приматов – полуобезьяны и обезьяны образуют многообразную группу с чрезвычайно сложными формами социальной организации. В основном приматы обитают в тропических дождевых лесах. В состав этой группы входит 356 видов 11 семейств [118]. Собранная база данных приматов содержала информацию по 174 видам. Подотряд приматов – высшая группа животных в эволюционной цепочке, в которую входит также и человек.

Для изучения данных о животных в целом использовалась наиболее полная на сегодняшний день база данных позвоночных животных [120]. Нынешняя версия базы включает сведения о 4083 видах позвоночных. База данных охватывает рыб, амфибий, рептилий, птиц и млекопитающих. В базу внесены данные о максимальной продолжительности жизни, массе тела при рождении и во взрослом состоянии, скорости роста и размножения, времени полового созревания, продолжительности беременности и некоторые другие характеристики (всего более 25 показателей). База данных имеет также полную информацию о систематике биологических видов. Для изучения биоразнообразия дополнительно собрана информация об ареалах видов. С этой целью в базу внесена картографическая информация (характеризующая ареалы видов животных) с основной атрибутивной информацией (площадью областей распространения, привязкой к характерным природным и климатическим зонам и т.п.). Всего, для установления площадей и особенностей ареалов видов, было обработано около 800 карт распространения мышеобразных, белкообразных и приматов на поверхности Земли.

В процессе сбора пространственных данных осуществлялся поиск поисковыми системами Google и Yandex картографической информации с изображениями ареалов распространения исследуемых видов. Найденные растровые изображения были представлены в виде материков или отдельных их участков с нанесенными на них ареалами распространения тех или иных видов, которые визуально выделялись на фоне карты. Например, для мышеобразных собранная картографическая информация оцифрована и занесена в БД в виде численного значения площади для каждого из ареалов распространения всех видов мышей в отдельности и общей площади распространения каждого из видов. Также в БД помещена векторная карта мира с множеством слоев со всеми нанесенными на нее ареалами распространения всех анализируемых видов мышеобразных. Фотографии с изображениями внешнего вида мышеобразных и растровые изображения ареалов их распространения хранятся в виде файлов в формате *.png. с достаточно хорошим сжатием изображения и минимальной потерей качества.

С помощью картографического метода осуществлена пошаговая оцифровка и обработка растровых изображений, а именно определение границ ареалов распространения видов и площадей соответствующих полигонов.

Для создания БД, статистической и графической обработки информации использована система MapInfo, совмещающая преимущества обработки информации, которыми обладают БД (в том числе язык запросов SQL), и наглядность карт, списков и графиков. Это позволило спроектировать БД некоторых отрядов животных и наполнить её текстовыми, графическими и численными данными с возможностью определения параметров графических объектов (установление границ и определение площади ареала обитания).

Используемая методика обработки графических данных представляет собой пошаговый процесс оцифровки растровых изображений и их обработку: определение границ областей и площадей полигонов. После привязки крайних точек растровой карты к координатам на векторной карте мира растровое изображение становилось оцифрованным. Далее обозначались границы ареала распространения животных, что позволило определить площадь данного ареала, населяемую тем или иным видом (рис. 5.11).

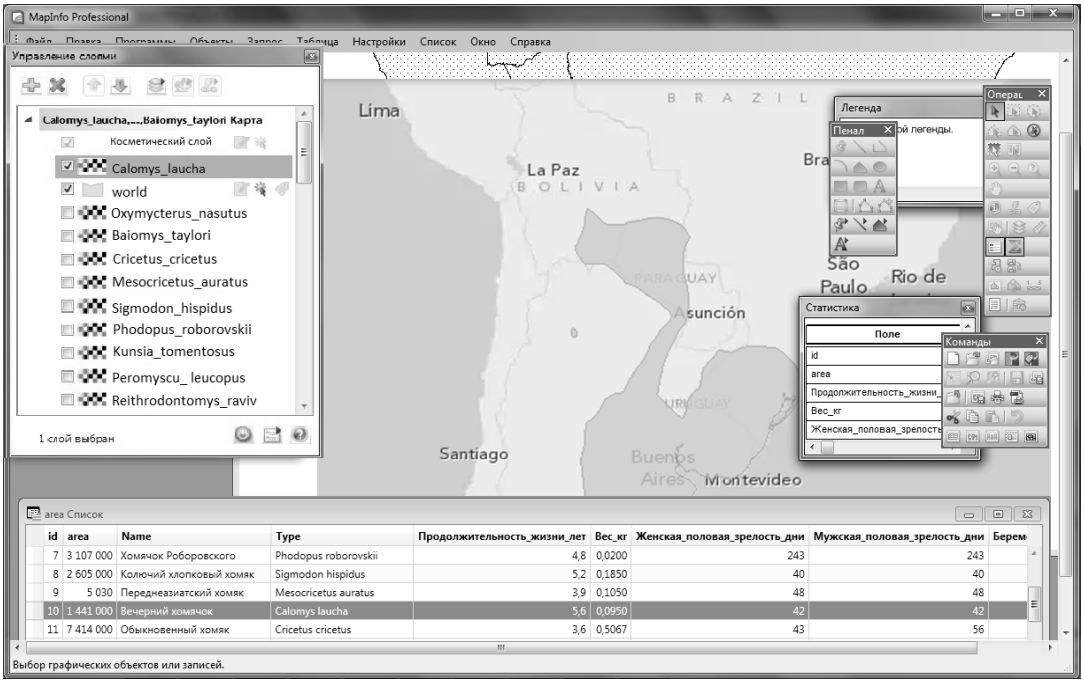

Рисунок 5.11. – Результат оцифровки растрового изображения

Например, для мышеобразных обработано порядка 300 карт, характеризующих распространение их видов на Земной поверхности. Наполнение БД происходило в следующей последовательности. Вначале выбиралось в виде полигона оцифрованное изображение ареала распространения вида, к которому впоследствии привязывалась атрибутивная информация (рис. 5.12), вносимая вручную. При выборе точки на пересечении ареалов распространения видов, обитающих на территории с определенной широтой и долготой, отображался список площадей ареалов их распространения (рис. 5.13).

Рисунок 5.12. – Привязка атрибутивной информации

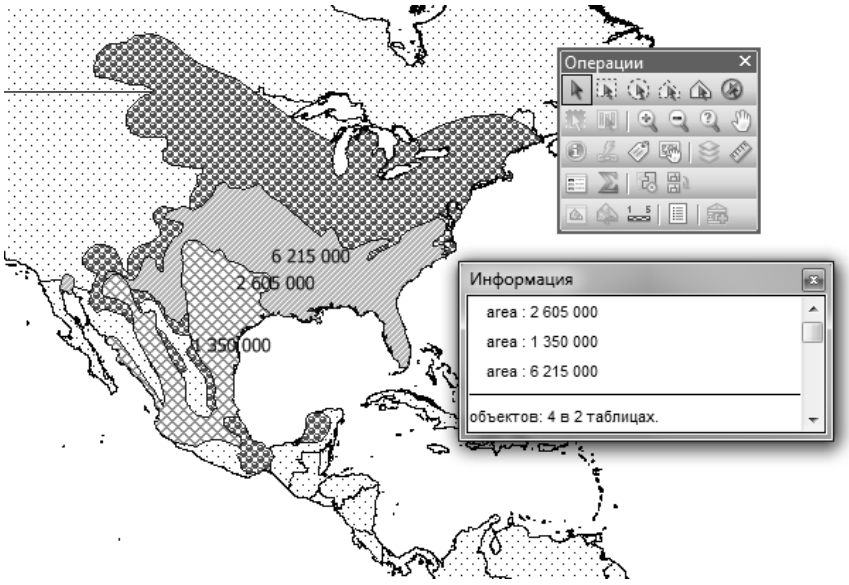

Рисунок 5.13. – Выбор точки на пересечении ареалов распространения мышеобразных

Полученное векторное изображение, находящееся в созданной БД, представляет собой один из слоев изображений проекта. Для выбора отображаемых слоёв необходимо инструментом управления слоями указать на необходимый слой.

Перечисленные выше данные использовались для создания вероятностных моделей взаимосвязи показателей и ареалов видов животных на основе предлагаемой методики. Для того, чтобы подойти к разработке моделей биоразнообразия планеты, подобную работу следует осуществить для всех видов животных, количественная информация о которых имеется, например, в наиболее распространенных базах данных [29, 120], а это минимум несколько тысяч видов. Аналогичная работа должна быть выполнена и для растений.

Вероятностные модели биоразнообразия для исследуемых биологических групп.

На основе собранных данных можно оценить вероятности событий наблюдения показателей и ареалов видов и установить взаимосвязи между вероятностями таких событий. Для оценки ареалов видов предложено использовать геометрические вероятности, представляющие собой отношение площади ареала распространения каждого из видов к площади ареалов наиболее распространенных видов или к площади сухопутной части поверхности Земли. Поиск вероятностных закономерностей осуществляется в виде зависимостей между геометрическими вероятностями и различными биологическими параметрами каждой из групп или климатическими показателями окружающей среды.

В свою очередь, вероятностные модели, характеризующие состояния видов, ищутся в виде уравнений связи между статистическими вероятностями совместных событий наблюдения некоторых биологических показателей и значениями этих показателей. Между вероятностями различных событий, например, вероятностями событий наблюдения ареалов и вероятностями совместных событий наблюдения биологических показателей, также можно искать взаимосвязи.

Для построения уравнений была применена используемая ранее методика оценки вероятности значимых событий. Сегодня в прогрессивной эволюции животных также используются различные

уравнения состояний, например, в виде самых разнообразных аллометрических соотношений [57]. Однако точность таких зависимостей пока недостаточна для получения надежных феноменологических выводов, позволяющих характеризовать процессы эволюции. Одна из основных причин этого связана с отсутствием достаточного объема структурированных и достоверных данных наблюдений о морфологических и физиологических показателях биологических организмов.

Известно, что огромный объем количественных знаний о свойствах и закономерностях поведения различных систем обычно представляется в форме уравнений состояний, где одни параметры систем выражаются через другие. Уравнения состояний строятся чаще всего на базе эмпирических данных. Такого рода уравнения, задаваемые независимо от содержания исследуемой задачи, в принципе должны существовать для любой системы, каковы бы ни были её индивидуальные особенности. Основное условие для существования уравнений – это наличие достаточного для анализа объема опытной информации, которая, в свою очередь, может быть описана зависимостями с необходимой точностью. Факт существования уравнений состояний отражает эмпирический опыт человечества в области изучения систем самой разной природы. Обычно уравнения состояния представляются в виде:

$$f(p_1, p_2, p_3, \ldots, p_n) = 0. \qquad (5.14)$$

В данных уравнениях параметры p_i, характеризующие свойства, совокупностью которых определяется состояние системы или объекта, связаны друг с другом: с изменением одного из них изменяется, по крайней мере, еще одно. Эта взаимосвязь находит выражение в функциональной зависимости вида (5.14), которая определяет реально наблюдаемые состояния через свойства системы.

Ответ на вопрос о возможности построения уравнений состояний для биологических и экологических систем достаточно актуален и его решение может лежать в системе взглядов и научных представлений, которыми располагает системный анализ. Основная проблема для данных систем связана с необходимостью построения множества уравнений, связывающих между собой различные показатели биологических видов с

достаточной для проведения исследований точностью. Методология системного анализа основывается на использовании общесистемных закономерностей, наблюдаемых в природе и обществе. Поэтому, попытаемся подойти к решению поставленной задачи, исходя из универсальности статистических закономерностей процессов и явлений.

В качестве основного события, характеризующего биологический вид, примем совместное событие одновременного наблюдения нескольких биологических показателей. Вероятность такого события w определялась алгоритмически по опытным данным.

Для реализации сформулированных методических подходов были использованы массивы информации из базы данных AnAge Database [120], для чего делались выборки данных (для разных таксонов и всех животных в целом) при различных комбинациях биологических показателей. Характеристика групп данных по исследуемым случаям дана в таблице 5.9.

В качестве атрибутивных показателей биологических видов для построения уравнений состояний могут использоваться следующие величины p_i – максимальная продолжительность жизни в неволе, лет; вес взрослой особи и вес тела, кг; уровень метаболизма, Ватт; временные интервалы мужской и женской зрелости, дней. Надо отметить, что это наиболее изученные показатели, для которых существуют достоверные данные для многих видов животных [120].

Общая регрессионная зависимость статистической вероятности совместного события наблюдения двух или трех показателей для различных таксонов или всей группы животных в целом ищется в виде:

$$\Pr = a_0 + s;\ s = \alpha_1 \cdot \ln \frac{p_1}{p_{1*}} + \alpha_2 \cdot \ln \frac{p_2}{p_{2*}}$$

$$\text{или}\quad s = \alpha_1 \cdot \ln \frac{p_1}{p_{1*}} + \alpha_2 \cdot \ln \frac{p_2}{p_{2*}} + \alpha_3 \cdot \ln \frac{p_3}{p_{3*}}, \qquad (5.15)$$

где α_i – константы. В качестве опорных параметров принимались максимально наблюдаемые значения показателей $p_{i*} = p_{i\max}$ в каждой изучаемой группе видов. В этом случае значения величин $\rho_i = p_i / p_{i\max}$ являются геометрическими вероятностями распределения событий, связанных с наблюдением каждого показателя p_i. Статистическая вероятность совместного события w определялась алгоритмически через

относительные частоты событий. Некоторые из полученных уравнений состояний видов для различных комбинаций показателей приведены в таблице 5.9 и на рисунках 5.14 – 5.17. Величины $p_{i\max}$ при построении каждого уравнения состояний принимались, исходя из наблюдаемых данных о максимальных значениях показателей в изучаемых группах животных.

Сформулированный подход позволяет искать связи и закономерности между вероятностями наблюдения различных событий, свойственных изучаемой группе биологических видов, соответствующие показатели которых имеются в анализируемом массиве данных. Например, на рисунке 5.18 представлена связь между вероятностью событием наблюдения веса взрослой особи и вероятностью совместного события одновременного наблюдения продолжительности жизни и уровня метаболизма среди позвоночных животных.

Таблица 5.9. – Уравнения состояний видов позвоночных животных

Таксоны	Число видов	Уравнение состояний	Основные показатели	Коэф. корреляции	Относит. ошибка, %
Все животные в целом	2548	$\mathrm{Pr} = 3{,}676 + 0{,}778 \cdot \ln\frac{p_1}{p_{1\max}} + 0{,}184 \cdot \ln\frac{p_2}{p_{2\max}}$	p_1, p_2	0,97	9,8
Все животные в целом	546	$\mathrm{Pr} = 3{,}544 + 0{,}738 \cdot \ln\frac{p_1}{p_{1\max}} + 0{,}326 \cdot \ln\frac{p_3}{p_{3\max}}$	p_1, p_3	0,96	10,7
Все животные в целом	546	$\mathrm{Pr} = 3{,}568 + 0{,}721 \cdot \ln\frac{p_1}{p_{1\max}} - 0{,}011 \cdot \ln\frac{p_2}{p_{2\max}} + \ldots + 0{,}361 \cdot \ln\frac{p_3}{p_{3\max}}$	p_1, p_2, p_3	0,96	10,9
Мышеобразные	109	$\mathrm{Pr} = 3{,}052 + 0{,}936 \cdot \ln\frac{p_1}{p_{1\max}} + 0{,}135 \cdot \ln\frac{p_2}{p_{2\max}} + \ldots + 0{,}462 \cdot \ln\frac{p_3}{p_{3\max}}$	p_1, p_2, p_3	0,94	11,2
Белкообразные	90	$\mathrm{Pr} = 1{,}133 + 1{,}325 \cdot \ln\frac{p_1}{p_{1\max}} + 0{,}353 \cdot \ln\frac{p_2}{p_{2\max}}$	p_1, p_2	0,98	8,9
Приматы	150	$\mathrm{Pr} = 1{,}778 + 1{,}179 \cdot \ln\frac{p_1}{p_{1\max}} + 0{,}292 \cdot \ln\frac{p_2}{p_{2\max}}$	p_1, p_2	0,97	11,1

p_1 – максимальная продолжительность жизни, лет; p_2 – вес взрослой особи, кг; p_3 – уровень метаболизма, Ват; $p_{i\max}$ – максимально наблюдаемые значения i-ых показателей в изучаемых группах животных, $i = 1, \ldots 3$.

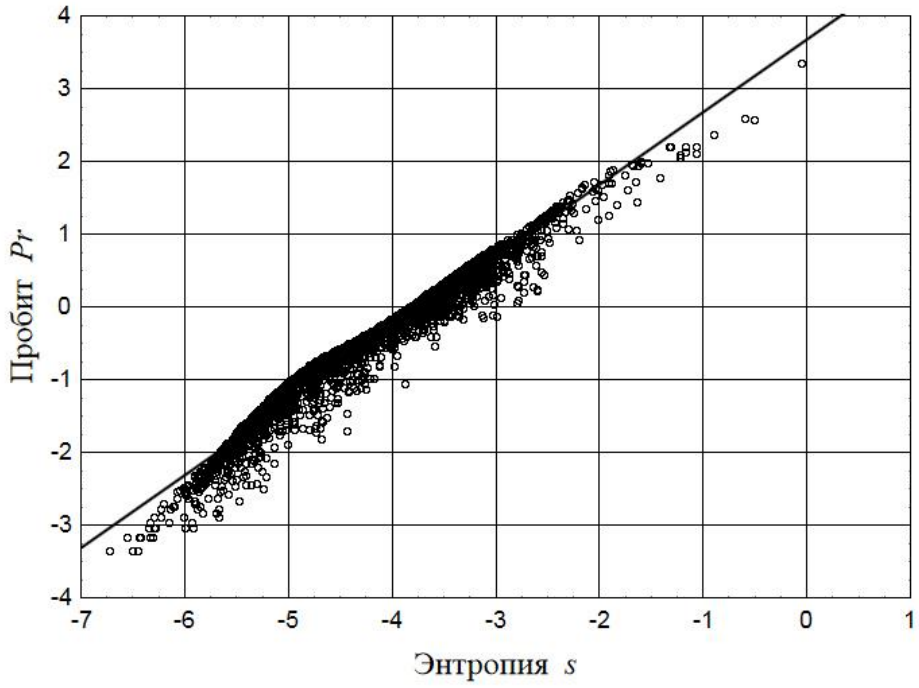

Рисунок 5.14. – Зависимость вероятности w от величины s для продолжительности жизни и веса позвоночных животных

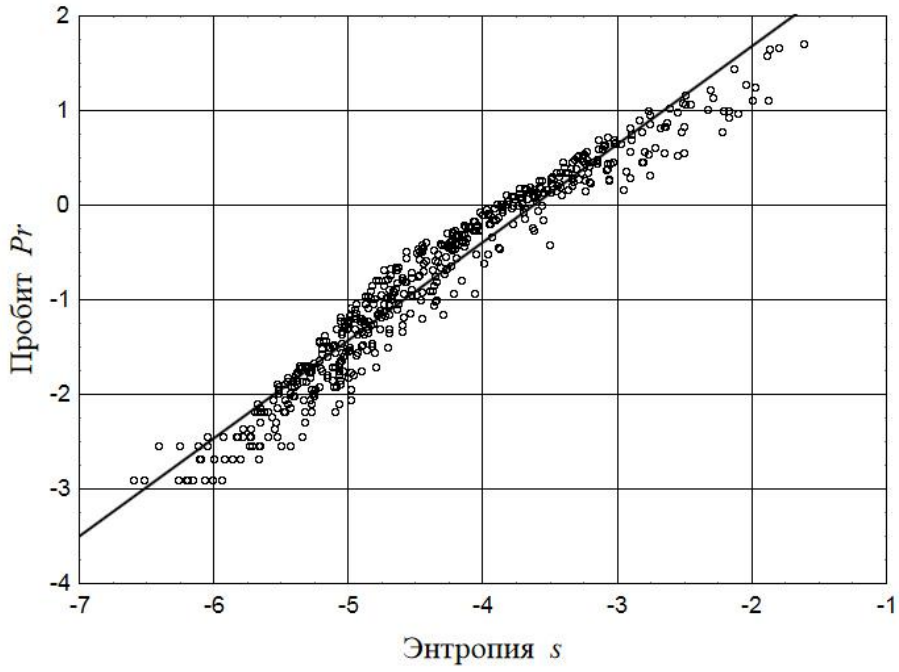

Рисунок 5.15. – Зависимость вероятности w от величины s для продолжительности жизни, веса и уровня метаболизма позвоночных животных

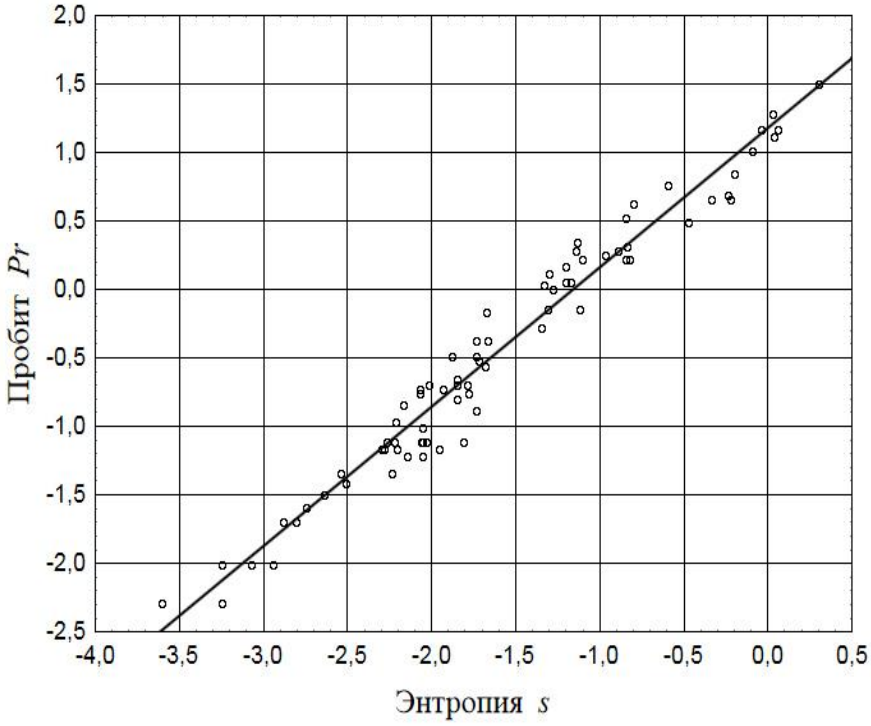

Рисунок 5.16. – Зависимость вероятности w от величины s для продолжительности жизни и веса белкообразных

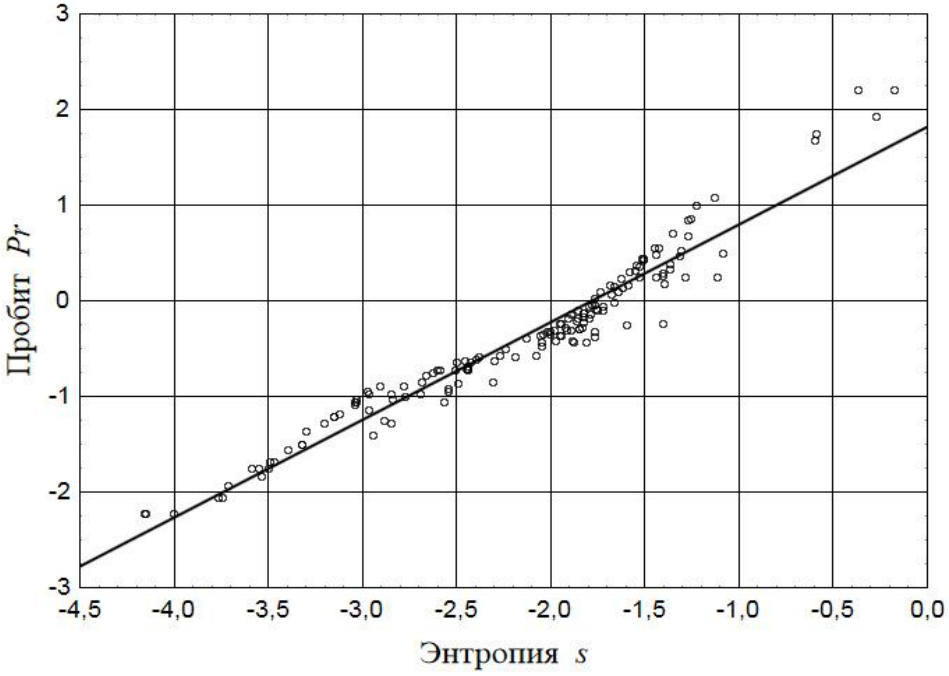

Рисунок 5.17. – Зависимость вероятности w от величины s для продолжительности жизни и веса приматов

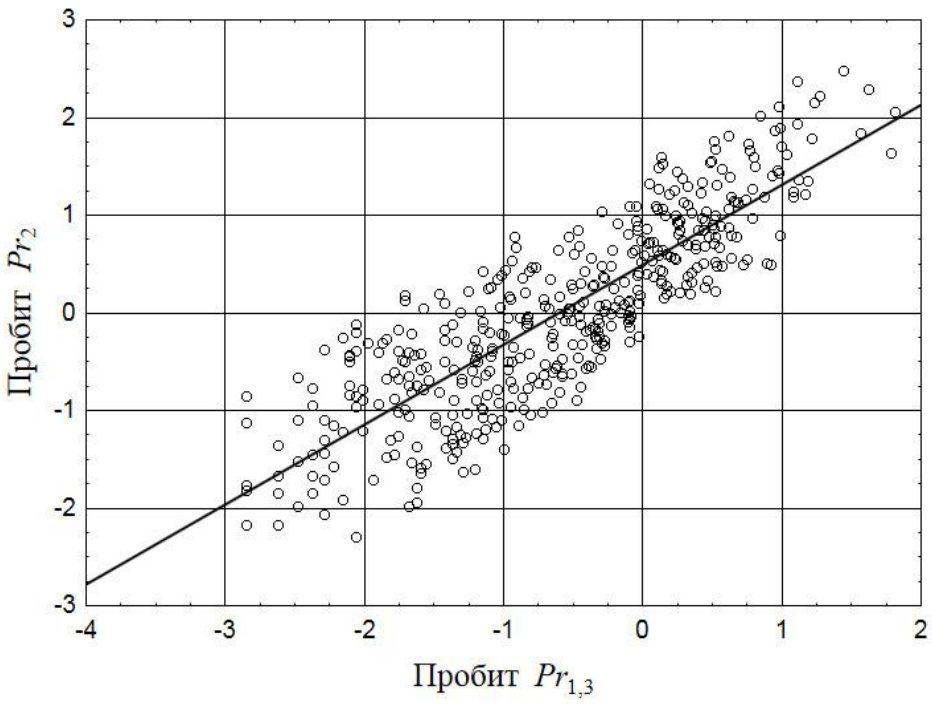

Рисунок 5.18. – Зависимость вероятности w_2 событий наблюдения веса взрослой особи от вероятности $w_{1,3}$ совместных событий наблюдения продолжительности жизни и уровня метаболизма для позвоночных животных

Аналогичным образом устанавливались связи событий, характеризующих биологический вид, с событиями, определяющими его распространение. Например, для мышеобразных были получены вероятностные модели распространения видов. На основе значений площади ареалов видов были найдены геометрические вероятности путем деления площади ареалов каждого из видов мышеобразных на площадь ареала домовой мыши ($Ar_0 = 29980000\,\text{км}^2$). Наиболее значимые связи вероятности распространения видов установлены с температурой тела особей (рис. 5.19). Зависимость вероятности распространения видов от температуры тела имеет вид:

$$\Pr ob_{Ar} = -1{,}335 + 8{,}803 \cdot \ln \frac{t}{t_0}, \qquad (5.16)$$

где t – температура тела каждого вида мышеобразных; $\Pr ob_{Ar}$ – пробит вероятности распространения видов мышеобразных, $t_0 = 39{,}0^\circ$ – средняя температура тела домовой мыши.

Данная зависимость является значимой, коэффициент корреляции зависимости составил 0,6. Аналогичные зависимости были получены для белкообразных и приматов.

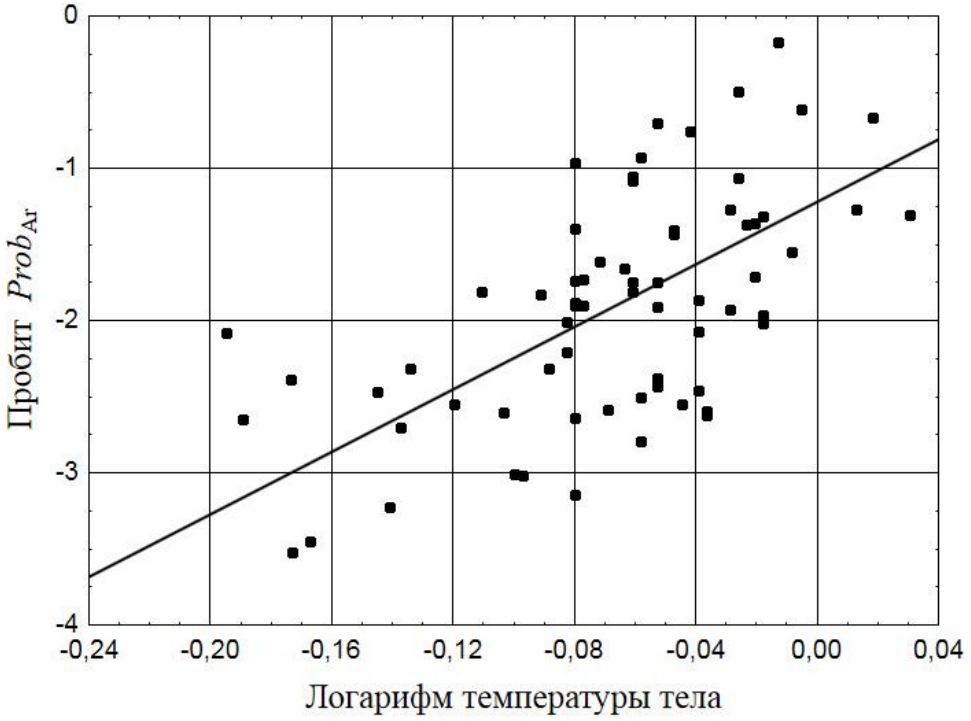

Рисунок 5.19. – Зависимость вероятности распространения видов подотряда мышеобразных от температуры тела особей соответствующего вида

Из приведенных результатов вытекает особенность, что области распространения видов по площади больше у тех видов, у которых температура тела особей выше. Так как существует связь между вероятностью распространения вида и температурой тела мышеобразных, белкообразных и приматов, то естественно предположить существование связи вероятности распространения видов с климатическими показателями. В результате анализа также было установлено, что идентичные зависимости вида (5.15), связывающие между собой различные биологические показатели видов и их ареалы, отличаются коэффициентами α_i для каждой из изучаемых групп (мышеобразные, белкообразные и приматы).

Феноменологические соотношения для биологических показателей видов

По аналогии с идеями работы [7] получим важные феноменологические соотношения для оценки состояний видов. Вероятность состояния биообъекта, определенная по совместным событиям наблюдения в совокупности нескольких показателей, и её связь с параметрами состояния через эмпирическую функцию состояния пробит $\Pr$ – это та основа, на базе которой могут быть найдены основные феноменологические соотношения. Для получения подобных соотношений воспользуемся логическими подходами построения моделей систем, принятыми в термодинамике и системодинамике [7].

Предположим, что в пространстве H^n можно выбрать некоторую опорную точку $M_0(p_{1_0}, p_{2_0},...,p_{n_0})$, отличающуюся определенным признаком, тогда в криволинейных координатах пространства H^n положение любой многомерной точки $M(p_1, p_2,...,p_n)$ можно соотнести с положением данной точки M_0 и тем самым ввести количественную меру для сравнения биологических видов, которая будет связана с изменением совокупности показателей. В качестве опорной точки может быть выбрана точка пространства видов H^n с максимальными групповыми значениями показателей или точка, характеризующая некоторый определенный вид.

Для любой точки M дифференциал функции пробита согласно (5.15) может быть представлен для двух или трех переменных в виде:

$$d\Pr = \alpha_1 \cdot \frac{dp_1}{p_1} + \alpha_2 \cdot \frac{dp_2}{p_2} \quad \text{или} \quad d\Pr = \alpha_1 \cdot \frac{dp_1}{p_1} + \alpha_2 \cdot \frac{dp_2}{p_2} + \alpha_3 \cdot \frac{dp_3}{p_3}. \qquad (5.17)$$

В свою очередь, в n-мерном пространстве переменных H^n можно для той же точки M найти геометрическую вероятность, которая будет иметь вид:

$$\rho = \frac{p_1 \cdot p_2}{p_{1m} \cdot p_{2m}} \quad \text{или} \quad \rho = \frac{p_1 \cdot p_2 \cdot p_3}{p_{1m} \cdot p_{2m} \cdot p_{3m}}, \qquad (5.18)$$

где p_{1m}, p_{2m}, p_{3m} – максимальные значения показателей, наблюдаемые во всем массиве данных, которые характеризуют определенную группу позвоночных животных.

Из полученных уравнений состояний (5.15) видно, что $d\,\mathrm{Pr} = ds$. Исходя из этого, рассмотрим для примера уравнение состояний с двумя переменными p_1 и p_2, в качестве которых могут приниматься любые показатели биологических видов. Сделав обозначение $R_m = p_{1m} \cdot p_{2m}$, определим с учетом соотношений (5.17) и (5.18) изменение статистической вероятности в следующем виде:

$$dw = \rho \cdot d\,\mathrm{Pr} = \rho \cdot \left(\alpha_1 \cdot \frac{dp_1}{p_1} + \alpha_2 \cdot \frac{dp_2}{p_2} \right) = \frac{1}{R_m} \left(\alpha_1 \cdot p_2 \cdot dp_1 + \alpha_2 \cdot p_1 \cdot dp_2 \right). \quad (5.19)$$

Преобразуя данное уравнение, получим следующую зависимость:

$$dw = du + \frac{p_2 \cdot dp_1}{R_m}, \quad (5.20)$$

где величина du равна:

$$du = \frac{1}{R_m} \left(\alpha_1 \cdot p_2 \cdot dp_1 + \alpha_2 \cdot p_1 \cdot dp_2 \right) - \frac{1}{R_m} p_2 \cdot dp_1.$$

Применяя к величине du признак Эйлера для пфаффовых форм, получим, что du является полным дифференциалом (функцией состояния) при выполнении следующего условия:

$$\alpha_1 - \alpha_2 = 1. \quad (5.21)$$

Легко показать, что в этом случае $du = \alpha_2 \cdot d\rho, \quad di = d(u + \rho) = \alpha_1 \cdot d\rho$, а величины du и di зависят только от геометрической вероятности ρ.

Если приведенные выше гипотезы являются справедливыми, то на основе обработки опытных данных можно получить эмпирический аналог уравнения (5.20) и тем самым установить некоторый закон «сохранения» для изучаемой биологической системы. По аналогии с [7], зная значения геометрической вероятности ρ в виде (5.18) и величины α_i (таблица 5.9), легко определить энтропию системы s на основе зависимости (5.15) и величину $u = \alpha_2 \cdot \rho$. Из уравнения состояния для всех животных в целом $\mathrm{Pr} = 3{,}676 + 0{,}778 \cdot \ln \frac{p_1}{p_{1m}} + 0{,}184 \cdot \ln \frac{p_2}{p_{2m}}$ следует, что $\alpha_1 - \alpha_2 = 0{,}594$. Исходя из этого, так как $\alpha_1 - \alpha_2 \neq 1$, уравнение (5.20) будет давать определенные погрешности. Поэтому, используя вид уравнения сохранения (5.20), определим параметры уравнения путем обработки всего массива данных для двух биологических показателей позвоночных

животных – продолжительности жизни и веса взрослой особи. Результаты обработки данных приведены на рисунке 5.20, а соответствующее уравнение в конечно-разностной форме имеет вид:

$$\rho \cdot \Delta s = \Delta u - 0{,}466 \cdot \frac{p_2}{R_m} \cdot \Delta p_1 - 7{,}4 \cdot 10^{-7}, \qquad (5.22)$$

где $\Delta s = s - s_0$, $\Delta u = \alpha_2 \cdot \rho$, $\Delta z_1 = 211 - p_1$ (лет) – приращения величин относительно опорной точки M_0 с максимально наблюдаемыми значениями переменных; $R_m = 28{,}7 \cdot 10^6$ (лет · кг). Значение величин s и u при геометрической вероятности $\rho = 1$ приняты равными нулю. Коэффициент корреляции для уравнения (5.22) составляет 0,95, средняя относительная ошибка – 5,2%.

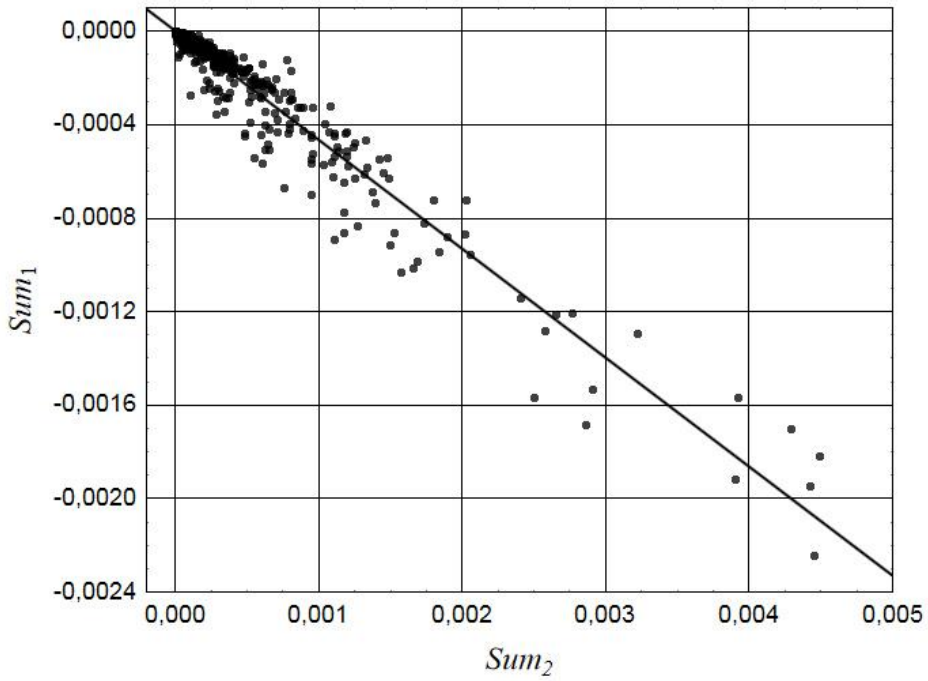

Рисунок 5.20. – Результаты обработки данных согласно уравнения сохранения (5.22): $Sum_1 = \rho \cdot \Delta s - \Delta u$; $Sum_2 = (p_2 / R_m) \cdot \Delta p_1$

Анализ показывает, что для всех случаев, для которых были найдены уравнения состояний, могут быть получены соотношения вида (5.20) в форме:

$$\rho \cdot ds = du + \beta_1 \cdot \frac{p_2}{R_m} \cdot dp_1 + \beta_0, \qquad (5.23)$$

где β_0, β_1 – константы.

Из приведенного материала видны определенные системные аналогии в построении моделей в термодинамике, системодинамике и биологии. Практически предложены достаточно простые феноменологические соотношения для описания физиологических показателей таксонов позвоночных животных на основе использования уравнений состояний вида (5.15) и зависимости для геометрической вероятности вида (5.18). Полученные соотношения позволяют количественно сравнивать между собой биологические виды по совокупности физиологических показателей. Это дает возможность изучать процессы эволюции видов, исходя из их комплексной биологической оценки.

Таким образом, существующие базы данных биологических показателей видов в комплексе с феноменологическими подходами анализа и описания опытных данных позволяют подойти к изучению вероятностных закономерностей состояний видов, исходя из изучения среднестатистических особенностей эволюции таксонов. Все это говорит о возможности создания теоретических методов анализа эволюционных процессов, по логике построения близких к естественнонаучным методам, применяемым сегодня в термодинамике [33], физике сплошных сред и системодинамике [7].

5.6 Комплексная оценка состояния социальных групп

В качестве одного из важных практических результатов применения предложенных вероятностных методов комплексной оценки рассмотрим пример рейтингования качества деятельности социальных групп. Сегодня в практике управления качеством высшего образования отмечается возрастающий интерес к формированию и использованию систем рейтинговых оценок университетов, их структурных подразделений и профессорско-преподавательского состава (ППС). Это, в первую очередь, связано с заинтересованностью общества в наличии доступной и достоверной информации о качестве образования в различных высших образовательных учреждениях. Рейтинги университетов становятся

ориентиром для абитуриентов и родителей при выборе образовательного учреждения для получения квалификации, а также измерителями качества образования. Известно, что рейтинг (от англ. rating) – это индивидуальный числовой показатель оценки достижений некоторого субъекта в классификационном списке, который составляется экспертами соответствующих отраслей. В образовании рейтингование понимается как система мер и процедур, направленная на комплексную оценку профессиональной деятельности и уровня достижений структурных подразделений, коллективов и работников, а также учебной деятельности учащихся. Широкое внедрение рейтинговых оценок является одной из актуальных задач теории и практики управления образовательным процессом.

Попытки проведения комплексной оценки различных сторон деятельности образовательного учреждения с использованием методов социологических исследований начали осуществляться с середины прошлого века. Примером подобного подхода может служить рейтингование Ассоциации американских университетов, проведенное в 1959 году по методологии Кенинстона. Данная методика основывалась на опросах заведующих кафедрами высших учебных заведений и использовала в качестве определяющих критериев оценку качества кандидатских диссертаций и качество образования на факультетах [100]. Первый национальный рейтинг 50 лучших университетов США был опубликован в 1983 г. американским журналом U.S. News & World Report. Это положило начало многочисленным попыткам ранжировать и оценивать университеты, а так же деятельность преподавателей в разных вузах [89]. В свою очередь, глобальный (общемировой) рейтинг вузов (рейтинг 500 лучших университетов мира) был подготовлен в 2003 году Шанхайским университетом (Shanghai Jiao Tong University (SJTU)) в рамках проекта «Академический рейтинг университетов мира». В основу рейтинга положена бальная система учета показателей, связанных с получением выпускниками и профессорами университета премий или наград в области математики, учетом индекса цитирования и долей высоко цитируемых публикаций, количества публикаций, проиндексированных в Science Citation Index-expanded и Social Science Citation Index, а также с

научными достижениями университета. Интегральный показатель вуза определялся как средневзвешенное значение соответствующих показателей.

Сегодня существует пять наиболее признанных глобальных рейтингов университетов – ARWU, THE, QS, Web и PRSP, при этом используется значительное количество различных моделей формирования рейтингов высших учебных заведений, их подразделений и сотрудников [20, 89, 104 и др.]. Детально концепции, принципы, методологии и организационные аспекты построения рейтингов и табелей о рангах, особенности составления глобальных рейтингов университетов, их анализ, влияние на политику в сфере высшего образования, выбор индикаторов, методические особенности и недостатки рейтинговых систем, а также проблемы выбора весовых коэффициентов и способов агрегирования индикаторов и т.п. изложены в работах [20, 89, 100, 101]. При этом многие авторы отмечают, что важной тенденцией в данной области является усовершенствование методик рейтингования.

Последнее время при комплексных оценках различных социальных систем используются в основном методы многомерного ранжирования, при этом применяются экспертные методы оценки, которые отличаются между собой набором оцениваемых факторов и системой весовых коэффициентов [20, 104, 107].

Чаще всего цель комплексной оценки социальных систем заключается в изучении их состояния по совокупности показателей на основе установления соответствия определенным уровням или нормам, в сравнении социальных объектов между собой, а также в учете значимых достижений, событий и мероприятий, связанных с деятельностью работников и коллективов. Комплексная оценка, многопараметрическое ранжирование и рейтингование систем обычно основывается на применении индикативных показателей или суммарной бальной оценке полученных достижений и выполненных мероприятий и работ в определенных аспектах профессиональной деятельности [24, 100, 101].

При изучении различных направлений деятельности социальных коллективов с целью эффективности анализа информации обработка данных обычно осуществляется по группам из нескольких показателей и

критериев, которые могут иметь различную природу. При этом надо отметить, что подавляющее большинство современных методов комплексной и рейтинговой оценки социальных коллективов является экспертными, т.е. по своей природе субъективными [100, 101, 104]. Исключение субъективной составляющей из процедур рейтингования встречает значительные методологические трудности, так как требует применения объективных методов анализа разноплановой информации.

Совершенствование методологии социального рейтингования видится в использовании событийных методов оценки значимой информации, что связано с возможностью представления результатов, учитываемых при рейтингах, в виде сложных индикативных событий.

Целью данного подраздела является иллюстрация возможности применения вероятностных методов анализа и описания разноплановой социально и профессионально значимой информации, представляемой в виде событий, для повышения объективности принятия решений на основе рейтинговых оценок.

Методология социального рейтингования может быть построена на основе оценки вероятностей совместных индикативных событий. Общий подход комплексного анализа социальных объектов по совокупности количественных показателей $p_1, p_2, ..., p_n$ предполагает представление состояний однотипных объектов в многомерном информационном пространстве этих показателей в виде облака точек и оценку положения каждого объекта в этом пространстве по отношению ко всей группе изучаемых объектов. Многомерное информационное пространство H^n формируется как декартовое пространство координат, в качестве которых выступают атрибутивные показатели $p_1, p_2, ..., p_n$. Для оценки положения точек в данном пространстве могут быть использованы различные методы объективного анализа данных. Например, можно факт одновременного наблюдения нескольких показателей объекта рассматривать как сложное совместное событие и оценивать вероятность такого события известными методами. Также можно найти в данном пространстве расстояние от начала координат до каждой точки и для данной характеристической величины изучаемого события оценить распределение вероятностей. Возможно также определение расстояния от каждой точки до центра

тяжести всего облака изучаемых точек и последующая оценка вероятности распределения данной характеристической величины и т.д.

Будем представлять систему социальной природы в виде совокупности объектов одного класса, например: граждан, работников, коллективов, структурных подразделений, организаций или учреждений и т.д. Все объекты изучаемой системы имеют определенное число основных наблюдаемых показателей $p_1, p_2, ..., p_n$, которые могут изменяться от нуля до некоторых максимальных значений. Значения показателей могут быть выражены размерными или безразмерными величинами. Безразмерными являются, например, относительные и сравнительные показатели. Для выражения размерности показателей могут использоваться общепринятые единицы измерения, оценки в баллах или пунктах по соответствующей шкале измерений. В результате сбора статистической информации формируется массив структурированных данных, в котором каждая таблица имеет структуру «объекты – показатели», а различные таблицы соответствуют разным периодам времени. Информация о многих социальных системах может быть представлена в подобном виде.

Основные предлагаемые идеи и гипотезы событийной оценки при определении рейтингов социальных групп формулируем в виде:

- использование данных о состоянии социальных систем в самых разных аспектах, а также алгоритмическое определение вероятностей совместных событий w, связанных с одновременным наблюдением индикативных показателей, позволит установить основные среднестатистические закономерности поведения социальных групп;
- статистические вероятности для индикативных сложных событий могут быть найдены эмпирически с использованием алгоритмов оценки вероятностей событий в общей выборке всех наблюдений;
- предполагается, что для всего времени наблюдений существует общее вероятностное пространство состояний всех объектов H^n, процессы в котором могут быть описаны математическими методами, позволяющими провести комплексную оценку и их многопараметрическое ранжирование;

• применительно к каждой таблице массива данных любой изучаемый социальный объект в пространстве H^n отображается точкой M, положение которой определяется значениями показателей $p_1, p_2, ..., p_n$;

• для пространства состояний системы H^n предполагается справедливость гипотезы о связи статистической вероятности совместных индикативных событий и геометрической вероятности состояний объектов в виде динамической зависимости $dw = c_l \cdot d\rho$, где величины c_l определяются по статистическим данным, исходя из закономерностей осуществления процесса изменения состояния каждого объекта на фоне изменения состояний всей группы объектов;

• в пространстве состояний H^n геометрическая вероятность каждого состояния (каждого объекта) определяется зависимостью вида: $\rho = \dfrac{p_1 \cdot p_2 \cdot ... \cdot p_n}{p_{1\max} \cdot p_{2\max} \cdot ... \cdot p_{n\max}}$, где $p_{i\max}$ – максимальные значения наблюдаемых показателей в группе объектов;

• рейтинговая оценка и ранжирование объектов по совокупности показателей может проводиться путем определения функций состояния (энтропии s и потенциала P), которые характеризуют поверхности уровня и координатные линии в многомерном пространстве H^n для поля вероятности состояния всей системы в целом:

$$s = c_1 \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_{1\max}}\right) + c_2 \cdot \ln\left(\frac{p_2}{p_{2\max}}\right) + ... + c_n \cdot \ln\left(\frac{p_n}{p_{n\max}}\right), \qquad (5.24)$$

$$P = \frac{p_1^2 - p_{1\max}^2}{c_1} + \frac{p_2^2 - p_{2\max}^2}{c_2} + ... + \frac{p_3^2 - p_{3\max}^2}{c_3}, \qquad (5.25)$$

при условии, что величины s и P равны нулю при значениях показателей $p_i = p_{i\max}$.

Общая методика анализа данных предполагает следующую последовательность действий. Для рейтинговой оценки социальных объектов составляется база данных, в которой изучаемые объекты и информация о них представляется строками таблиц базы данных, а показатели, определяющие состояния объектов, – колонками таблиц. Каждому периоду рейтинговой оценки соответствует своя таблица данных.

Далее выделяются совместные события одновременного наблюдения нескольких показателей, которые являются индикативными и однозначно характеризуют в определенном аспекте состояния изучаемой системы. По таблице базы данных алгоритмическим путем определяются вероятности событий. Методом пробит-анализа изучаются связи между статистической вероятностью и показателями состояния системы и устанавливаются различные вероятностные распределения, характеризующие данную социальную систему. Полученные зависимости позволяют определить феноменологические величины c_l, свойственные данной социальной группе объектов. Далее осуществляется ранжирование объектов на основе критерия, который определяет многомерные поверхности уровня в виде потенциала пространства H^n путем применения уравнения (5.25). Ранги устанавливаются исходя из положения объектов по отношению к криволинейным координатам, которые являются энтропией и потенциалом вида (5.24) – (5.25).

Пример рейтинговой оценки деятельности структурных подразделений и работников

На практике целями рейтинговой оценки профессиональной деятельности в крупном вузе является объективный анализ уровня работы ППС, кафедр, факультетов и институтов, обеспечение заинтересованности работников в результатах своей деятельности, формирование основы для принятия обоснованных управленческих решений.

Рейтинговая оценка деятельности структурных подразделений и ППС обычно проводится по направлениям учебно-методической работы (УМР), научно-исследовательской деятельности (НИД) и организационно-воспитательной работы (ОВР).

Оценка уровня учебно-методической работы структурного подразделения вуза и преподавателей основывается на учете результатов методической деятельности в виде издания учебников и учебных пособий, повышения квалификации, участии в профессиональных, профессионально-педагогических конкурсах и олимпиадах, на учете результатов разработки учебно-методических комплексов дисциплин, образовательных программ и электронных методических материалов,

работах ППС, связанных с руководством образовательными программами, и т.д.

В свою очередь, оценка уровня научно-исследовательской деятельности ППС, кафедр и факультетов основывается на фактах издания монографий и статей с учетом их значимости, защиты диссертаций и получении патентов, участии в научных конференциях, на учете результатов работы с грантами, научно-исследовательскими работами и программами, выполнении различных видов научных работ, результатах внедрения НИР, работах по научному руководству студентами, магистрантами, аспирантами и докторантами и т.п.

Уровень организационно-воспитательной работы оценивается по работам в общественных объединениях, советах и комиссиях разного уровня, участию в спортивных и творческих конкурсах, руководству студенческими общественными клубами и объединениями, организации и проведению общественных, профориентационных, воспитательных, спортивных, творческих и культурно-массовых мероприятиях различного уровня и т.д.

Измерение критериев по направлениям учебно-методической работы, научно-исследовательской деятельности и организационно-воспитательной работы для ППС осуществляется в баллах, которые для указанных выше направлений деятельности суммируются. Каждому мероприятию, виду работы или результату присваивается заданное количество баллов по принятой в вузе шкале оценки мероприятий и работ. Исходя из этого, каждый преподаватель набирает определенное количество баллов по направлениям УМР, НИД и ОВР за выбранный период рейтингования. Значениями данных величин можно характеризовать деятельность ППС и определять в заданный период времени состояние объекта рейтингования.

Рейтинги структурных подразделений по каждому из направлений деятельности определяются, исходя из принятой методики, суммированием баллов ППС, работающих в соответствующем подразделении.

В качестве статистической информации для построения вероятностных моделей используем данные о рейтинговании сотрудников и структурных подразделений Белгородского государственного национального исследовательского университета (НИУ «БелГУ») за 2015–2016 годы. В университетской методике рейтингования в качестве основных показателей используются: показатель учебно-методической работы p_1, балл; показатель научно-исследовательской деятельности p_2, балл; показатель организационно-воспитательной работы p_3, балл. Для решения поставленной задачи воспользуемся базами данных автоматизированной системы НИУ «БелГУ» (http://dekanat.bsu.edu.ru/). По имеющимся данным с учетом алгоритмической оценки определены вероятности состояний объектов рейтингования разных социальных групп.

Исходя из полученных данных с учетом вероятностной оценки совместных событий, связанных с наблюдением показателей p_1, p_2, p_3, построены вероятностные модели состояния социальных объектов и определены ранги структурных подразделений и ППС. Соответствующая модель для кафедр вуза получена в виде пробит-зависимости величины вероятности совместных событий наблюдения показателей p_1, p_2, p_3 от энтропии состояния системы:

$$w = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \int_{-\infty}^{\Pr ob} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt; \qquad \Pr ob = 0{,}580 + s;$$

$$s = 0{,}286 \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_{1m}}\right) + 0{,}260 \cdot \ln\left(\frac{p_2}{p_{2m}}\right) + 0{,}167 \cdot \ln\left(\frac{p_3}{p_{3m}}\right). \qquad (5.26)$$

Коэффициент корреляции зависимости (5.26) составил 0,93, результаты обработки данных для 100 кафедр вуза приведены на рисунке 5.21. Показатели p_1, p_2, p_3 относились к значениям величин $p_{1\max}, p_{2\max}$, $p_{3\max}$, которые соответствуют выбранной опорной точке – максимально наблюдаемым значениям показателей в 2015 – 2016 годах, которые равны: $p_{1\max} = 245{,}3$ баллов; $p_{2\max} = 230{,}1$ баллов; $p_{3\max} = 219{,}4$ баллов.

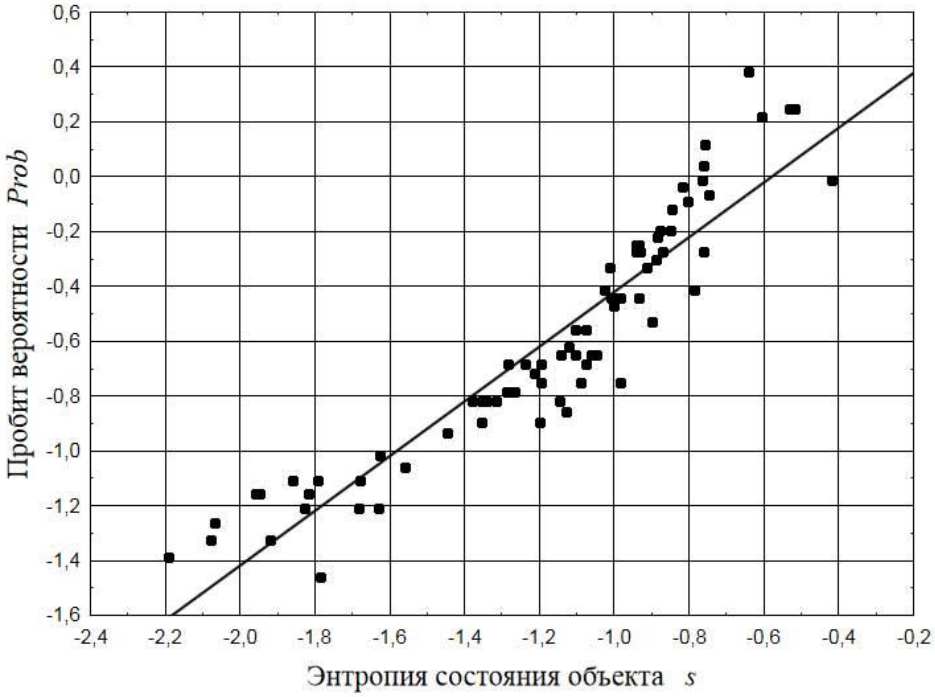

Рисунок 5.21. – Зависимость вероятности состояния w от энтропии состояния системы s для совместно наблюдаемых показателей p_1, p_2, p_3 для кафедр НИУ «БелГУ»

Подобная модель получена для профессорского состава вуза в виде пробит-зависимости вероятности совместных событий наблюдения показателей p_1, p_2, p_3 от энтропии состояния системы:

$$\Pr ob = 1{,}177 + s;$$

$$s = 0{,}187 \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_{1\max}}\right) + 0{,}232 \cdot \ln\left(\frac{p_2}{p_{2\max}}\right) + 0{,}220 \cdot \ln\left(\frac{p_3}{p_{3\max}}\right). \qquad (5.27)$$

Коэффициент корреляции зависимости (5.27) составил 0,96, результаты обработки данных для 180 профессоров вуза приведены на рисунке 5.22. В данном случае показатели относились к значениям $p_{1\max}, p_{2\max}, p_{3\max}$, которые соответственно равны: $p_{1\max} = 582$ балла; $p_{2\max} = 2065$ баллов; $p_{3\max} = 639$ баллов.

Аналогичным образом получены вероятностные модели для оценки качества деятельности других категорий ППС.

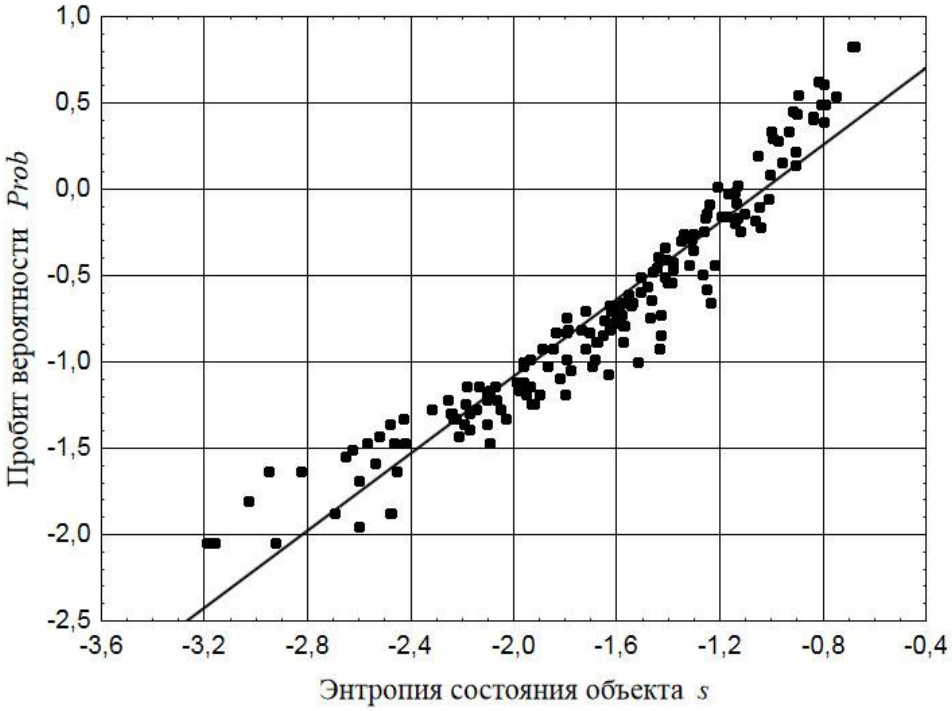

Рисунок 5.22. – Зависимость вероятности состояния w от энтропии состояния системы s для совместно наблюдаемых показателей p_1, p_2, p_3 для профессорского состава НИУ «БелГУ»

Таким образом, описание поведения социальных групп по совокупности показателей возможно на основе получения уравнений состояний, представленных в виде распределений вероятностей совместных индикативных событий. В случае получения таких эмпирических уравнений на основе данных наблюдений, возможно установление среднестатистических тенденций развития объектов в информационном пространстве состояний социальной системы и ранжирование положения каждого объекта в этом пространстве по отношению ко всей группе изучаемых объектов. Подобный подход открывает возможности для создания теоретических методов описания поведения систем общественной природы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аверин Г.В., Звягинцева А.В. Взаимосвязь термодинамической и информационной энтропии при описании состояний идеального газа // Системный анализ и информационные технологии в науках о природе и обществе, Донецк: ДонНТУ, № 1(4)–2(5), 2013. – С. 26 – 38.
2. Аверин Г.В., Звягинцева А.В. Закономерности формирования опасных процессов в сложных системах // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка, випуск 9 (132). – Донецьк: ДонНТУ. 2008 – С. 221 – 232.
3. Аверин Г.В., Звягинцева А.В. Опасность и риск как характеристики особых состояний экологических и техногенных систем // Екологічна безпека. Кременчуг. №2/2008 (2). – С. 22 – 30.
4. Аверин Г.В., Звягинцева А.В. Применение методов интеллектуального анализа данных при оценке развития Украины // Геотехнічна механіка. Випуск 112. Дніпропетровськ, 2013. – С. 242 – 255.
5. Аверин Г.В., Звягинцева А.В. Стратегическая оценка статуса Украины в современном мире по данным международных организаций. Часть 1: Теория и методика оценки // Системный анализ и информационные технологии в науках о природе и обществе, №1(2)–2(4). 2012. – С. 75 – 92.
6. Аверин Г.В. Общая теория систем: проблема создания формализованных теорий в области гуманитарного знания // Системный анализ и информационные технологии в науках о природе и обществе, Донецк: ДонНТУ, № 1(6)–2(7), 2014. – С. 30 – 41.
7. Аверин Г.В. Системодинамика. – Донецк: Донбасс, 2014. – 405 с. – Электр. ресурс. URL: http://www.chronos.msu.ru/ru/rnews/item/ sistemodinamika (20.05.16).
8. Аверин Г., Кишкань Р., Аверин Д., Звягинцева А. Доклад о состоянии окружающей природной среды города Донецка в 2006 – 2007 годах / Под ред. А. Лукьянченко. Донецк: Донецкий горсовет, ДонНТУ. 2008. – 114 с. – Электр. ресурс. URL: http://csm.donntu.org/sites/default/files/ projects/ doklad_donetsk_2006_2007.pdf (28.05.16).

9. Аверин Г., Новосад В., Звягинцева А., Аверин Е. Доклад о состоянии окружающей среды города Макеевки. / Под редакцией А.Н. Мальцева. Макеевка: Макеевский горсовет, ДонНТУ, 2008. – 68 с. – Электр. ресурс. URL: http://csm.donntu.org/sites/default/files/projects/doklad_makeevka.pdf (28.05.16).
10. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Основы моделирования и первичная обработка данных. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 471 с.
11. Акимов В.А., Новиков В.Д., Радаев Н.Н. Природные и техногенные чрезвычайные ситуации: опасности, угрозы, риски. – М.: ЗАО ФИД «Деловой экспресс», 2001. – 344 с.
12. Александрова Л.В., Васильев В.Ю., Дмитриев В.В. и др. Многокритериальные географо-экологические оценки состояния и устойчивости природных и урбанизированных систем / Под ред. В.В. Дмитриева и Н.В. Хованова. – Деп. ВИНИТИ №о 2342В00, 2000. – 275 с.
13. Алексеев В.В. и др. Физическое и математическое моделирование экосистем. – С.-Пб.: Гидрометеоиздат, 1992. – 368 с.
14. Алимов А.Ф., Дмитриев В.В., Флоринская Т.М. и др. Интегральная оценка экологического состояния и качества среды городских территорий / Под ред. А.К. Фролова. – С.-Пб., 1999. – 253 с.
15. Анохин П.К. Узловые вопросы теории функциональной системы. – М.: Наука, 1980. – 197 с.
16. Артюхов В.В., Мартынов А.С. Системная методология оценки устойчивости природно-антропогенных комплексов: теория, алгоритмы, количественные оценки. 2013. – 142 с. – Электр. ресурс. URL: http://www.sci.aha.ru/ots/Metodology.pdf, www.sci.aha.ru (17.06.16).
17. База данных индикаторов развития стран мира Всемирного банка. – Электр. Ресурс. URL: http://data.worldbank.org/ (10.06.16).
18. База данных Программы развития ООН. – Электр. ресурс. URL: http://hdr.undp.org/en/data (08.06.16).
19. Базы данных проекта «Биоразнообразие России». – Электр. ресурс. URL: http://www.zin.ru/BioDiv/bd_dbas.htm/ (25.05.16).

20. Балацкий Е.В., Екимова Н.А. 2012. Международные рейтинги университетов: практика составления и использования // Экономика образования. № 2. – С. 67 – 80.
21. Белов П.Г. Моделирование опасных процессов в техносфере. – М.: Академия гражданской защиты в техносфере МЧС РФ, 1999. – 124 с.
22. Берталанфи Л. Общая теория систем: критический обзор // Исследования по общей теории систем: Сборник переводов / Общ. ред. В.Н. Садовского и Э.Г. Юдина. – М.: Прогресс, 1969. – С. 23 – 82.
23. Битюкова В.Р. Социально-экологические проблемы развития городов России. Изд. 3-е. М.: Либроком, 2012. – 448 с.
24. Васильева Е.Ю., Трапицын С.Ю. Теория и практика оценки качества профессиональной деятельности профессорско-преподавательского состава вуза. С-Пб.: изд-во РГППУ им. А.И. Герцена, 2006. – 288 с.
25. Венцель Е.С. Теория вероятности. М.: Наука, 1971. – 576 с.
26. Временные методические указания по обоснованию предельно допустимых концентраций (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест. – М.: Минздрав СССР, Главное санитарно-эпидемиологич. управление. Утв. Минздравом СССР 15.06.88, № 4681–88. 1989. – 110 с.
27. Временные методические указания по проведению комплексной экологической оценки состояния атмосферного воздуха большого города / Под ред. В.Б. Миляева. М.: Минприроды России, НИИ Атмосфера. – 1995. – Электр. ресурс. URL: http://www.bestpravo.ru/rossijskoje/jl-normy/w8v.htm (12.05.16).
28. География и мониторинг биоразнообразия. // Колл. авторов. М.: Научный и учебно-методический центр Моск. ун-та, 2002. – 432 с.
29. Глобальная база данных по биоразнообразию – GBIF (Global Biodiversity Information Facility). – Электр. ресурс. URL: http://data.gbif.org/welcome.htm/ (25.05.16).
30. Глобальный рейтинг интегральной мощи 100 ведущих стран мира. Доклад–2008 к обсуждению. 2-е изд., дополн. – М.: Международная Академия исследований будущего, 2008. – 148 с.
31. ГН 2.1.6.1338-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест. Утв.

Минздравом России 21.05.03. М.: Росрегистр потенциально опасных химических и биологических веществ Минздрава РФ, 2003. – 86 с.
32. ГН 2.1.6.1339-03. Ориентировочные безопасные уровни воздействия (ОБУВ) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест. Утв. Минздравом России 21.05.03. – М.: Росрегистр потенциально опасных химических и биологических веществ Минздрава РФ, 2003. – 174 с.
33. Гухман А.А. Об основаниях термодинамики. М.: Энергоатомиздат, 1986. – 383 с.
34. Данилов-Данильян В.И., Залиханов М.Ч., Лосев К.С. Экологическая безопасность. Общие принципы и российский аспект. – М.: МНЭПУ, 2001. – 330 с.
35. Демидович Б.П., Марон И.А., Шувалова Э.З. Численные методы анализа. Приближение функций, дифференциальные и интегральные уравнения. – М.: Наука, 1967. – 368 с.
36. Дж. ван Гиг. Прикладная общая теория систем: в 2 – х книгах. Перевод с англ. / Под ред. Б.Г. Сушкова, В.С. Тюхтина. М.: Мир, 1981. – 733 с.
37. Доклад «Живая планета» / Всемирный фонд дикой природы. Пер. с англ. 2006, 2008, 2010, 2012, 2014. – Электр. ресурс. URL: http://www.wwf.ru/resources/publ (20.05.16).
38. Доклад о человеческом развитии 2010. «Реальное богатство народов: пути к развитию человека» / Пер. с англ.; ПРООН. – М.: Весь Мир, 2010. – 228 с. – Электр. ресурс. URL: http://www.un.org/ru/development/hdr/2010/hdr_2010_complete.pdf (04.05.16).
39. Доклад о человеческом развитии 2014. «Обеспечение устойчивого прогресса человечества: уменьшение уязвимости и формирование жизнестойкости» . / Пер. с англ.; ПРООН. – М.: Весь Мир, 2014. – 280 с. – Электр. ресурс. URL: http://hdr.undp.org/sites/default/files/hdr14-summary-ru.pdf (27.05.16).
40. Доклад о человеческом развитии 2015. «Труд во имя человеческого развития». / Пер. с англ.; ПРООН. – М.: Весь Мир, 2015. – 48 с. – Электр. ресурс. URL: http://hdr.undp.org/sites/default/files/hdr15_standalone_overview_ru.pdf (29.05.16).

41. Доклады о мировом развитии. Пер. с англ. публикации Всемирного банка: 2000 – 2015. М.: Весь мир. – Электр. ресурс. URL: www.worldbank.org (10.06.16).
42. Доклады о человеческом развитии (1990 – 2015 гг.). – Электр. рес. URL: http://hdr.undp.org/en/reports/ (25.11.16).
43. Дрибан В.М., Пенина Г.Г. Теория вероятностей. – Донецк: ДонГУЭТ, 2003. – 519 с.
44. ДСП-201-97. Державні санітарні правила охорони атмосферного повітря населених місць (від забруднення хімічними та біологічними речовинами) МОЗ України: Затв. 09.07.97, № 201. – К., 1997. – 40 с.
45. ДСТУ 2156-93. Безпечність промислових підприємств. К.: Держстандарт України, 1994. – 31 с.
46. Емельянов И.Г. Разнообразие и его роль в функциональной устойчивости и эволюции экосистем. К.: НАНУ, 1999. – 168 с.
47. Защита окружающей среды Европы – Четвертая оценка. Европейское агентство по окружающей среде, Копенгаген. Дания: Schultz Grafisk, 2007. – 452 с.
48. Звягинцева А.В. Комплексная оценка природно-антропогенных систем: предложения по развитию методологии // Системный анализ и информационные технологии в науках о природе и обществе. Донецк: Друк-инфо, 2013. № 1(4)–2(5). – С. 62 – 74.
49. Звягинцева А.В. Моделирование загрязнения атмосферного воздуха городов России на основе определения вероятности неблагоприятных событий // Научные ведомости БелГУ, серия «Экономика. Информатика». 2016. Выпуск 39. Белгород: Издательский дом «Белгород».
50. Звягинцева А.В. Модели существования и распространения видов животных для количественной оценки биологического разнообразия // Системный анализ и информационные технологии в науках о природе и обществе. Донецк: Друк-инфо, 2013. – № 1 (4) – 2(5). – С. 81 – 95.
51. Звягинцева А.В. Обоснование методов оценки и прогнозирования риска воздействий вредных веществ при загрязнении атмосферы промышленных городов: дис. … канд. техн. наук: 21.06.01 / Донецкий национальный технический ун-т. – Донецк, 2006. – 213 л. – Библиогр.: л. 169 – 181.

52. Звягинцева А.В. О вероятностном анализе данных наблюдений о состоянии природно-антропогенных систем в многомерных пространствах // Научные ведомости БелГУ, серия «Экономика. Информатика». 2016. №2 (223). Выпуск 37. Белгород: Издательский дом «Белгород». С. 93 – 100.
53. Звягинцева А.В. Оценка опасности загрязнения атмосферного воздуха промышленных городов Украины // Геотехнічна механіка. Випуск 109. Дніпропетровськ, 2013. – С. 233 – 243.
54. Звягинцева А.В, Перелыгина Н.В. Поиск зависимостей между показателями в базе данных распространения мышеобразных планеты. Сборник трудов III Всеукр. научн.-техн. конф. «Информационные управляющие системы и компьютерный мониторинг». Донецк: ДонНТУ, 2012. – С. 225 – 229.
55. Звягінцева Г.В. Методика з оцінки екологічних ризиків при забрудненні навколишнього природного середовища // Вісник Донецького національного університету. Серія А: Природничі науки, 2009. Випуск 2. С. 370 – 379.
56. Згуровский М.З. Глобальное моделирование процессов устойчивого развития в контексте качества и безопасности жизни людей (2005 – 2007/2008 годы). – К.: Политехника, 2008. – 331 с.
57. Зотин А.И., Зотин А.А. Направления, скорость и механизмы прогрессивной эволюции. Термодинамические основы. М.: Наука, 1999. – 435 с.
58. Индикаторы устойчивого развития: экономика, общество, природа / Бобылев С.Н., Зубаревич Н.В., Соловьева С.В., Власов Ю.С. Под ред. С.Н. Бобылева. – М.: МАКС Пресс, 2008. – 232 с.
59. Какарека С.В. Методические подходы к оценке суммарного загрязнения атмосферного воздуха // Природопользование: Сб. научн. тр. – Минск: СтройМедиаПроект, институт природопользования, 2014. Выпуск 25. – С. 61 – 69. – Электр. ресурс. URL: http://ecology.basnet.by/jornal/priroda25/PRIRODA_25_1.pdf (24.05.16).
60. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. – М.: Наука, 1976. – 576 с.

61. Качество воздуха в крупнейших городах России за 10 лет 1998 – 2007 гг. Аналитический обзор. – С.-Пб., 2009. – 134 с.
62. Качинський А.Б. Безпека, загрози і ризик: наукові концепції та математичні методи. – К.: ІПНБ РНБОУ, 2004. – 472 с.
63. Кирилин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е. Техническая термодинамика. – М.: Энергия, 1974. – 448 с.
64. Костицын В.А. Эволюция атмосферы, биосферы и климата. – М.: Наука, 1984. – 96 с.
65. Кошляков И.С. Уравнения в частных производных математической физики. – М.: Вища школа, 1970. – 712 с.
66. Красс М.С. Моделирование эколого-экономических систем. – М.: ИНФРА-М, 2010. – 272 с.
67. Кудрин Б.И. Исследования технических систем как сообществ изделий – Техноценозов // Системные исследования. Методологические проблемы. Ежегодник 1980. – М: Наука, 1981. С. 236 – 254.
68. Кузнецов О.Л., Большаков Б.Е. Устойчивое развитие. – С.-Пб., М. – Дубна: Гуманистика, 2002. – 615 с.
69. Курс обыкновенных дифференциальных уравнений / Н.П. Еругин, И.З. Штокало и др. – К.: Вища школа, 1974. – 472 с.
70. Куценко С.А. Основы токсикологии. – С.-Пб.: Военно-медицинская академия им. С.М. Кирова, 2002. – 395 с. – Электр. ресурс. URL: http://biochem.vsmu.edu.ua/biochem_common_u/toxycology.pdf (17.05.16).
71. Любищев А.А. Проблемы формы систематики эволюции организмов. – М.: Наука, 1982. – 281 с.
72. Маршал В. Основные опасности химических производств. – М.: Мир. – 1989. – 672 с.
73. Медоуз Д.Х., Медоуз Д.Л., Рандерс Й. За пределами роста. – М.: Прогресс, 1994. – 296 с.
74. Медоуз Д.Х., Медоуз Д.Л., Рандерс Й., Беренс В.В. Пределы роста. – М.: МГУ, 1991. – 205 с.
75. Международный индекс счастья. – Электр. рес. URL: http://www.happyplanetindex.org/ (30.05.16).
76. Международный интернет-ресурс о развитии стран мира. – Электр. рес. URL: http://www.tradingeconomics.com/ (10.06.16).

77. Методика визначення ризиків та їх прийнятних рівнів для декларування об’єктів підвищеної небезпеки. – К.: Основа, 2003. – 191 с.
78. Методика «Критерии оценки экологической обстановки территорий для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия. – М.: МПР РФ, 1992. – Электр. рес. URL: http://businesspravo.ru/Docum/DocumShow_DocumID_10592.html (19.05.16).
79. Методические рекомендации по определению реальной нагрузки на человека химических веществ, поступающих с атмосферным воздухом, водой и пищевыми продуктами. Утв. Минздравом СССР 30.03.82, № 2983-84 М. 1986. – 41 с.
80. Моделирование и прогнозирование мировой динамики / В.А. Садовничий, А.А. Акаев, А.В. Коротаев, С.Ю. Малков. – М.: ИСПИ РАН, 2012. – 359 с.
81. МР 2.2.12-142. Методичні рекомендації «Оцінка ризику для здоров’я населення від забруднення атмосферного повітря». Затв. МОЗ України 13.04.07, № 184. – К.: МОЗ України, 2007. – 40 с.
82. МУ 2.1.6.792-99. Выбор базовых показателей для социально-гигиенического мониторинга (атмосферный воздух населенных мест). – М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2000. – 28 с.
83. Музалевский А.А., Исидоров В.А. Индексы и составляющие экологического риска в оценке качества городской экосистемы // Вестник С.-Пб. ун-та. Сер. 4. 1998. № 11. Выпуск 2. – С. 74 – 83.
84. Мэгарран Э. Экологическое разнообразие и его измерение. – М.: Мир, 1992. – 184 с.
85. Николаевский В.С., Николаевская Т.В. Методика определения предельно допустимых концентраций вредных газов для растительности. – М.: МЛИ Госкомплес СССР, 1988. – 15 с.
86. Нормативы предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе и ориентировочно безопасных уровней воздействия загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных пунктов и мест массового отдыха населения. Утв. Минздравом республики Беларусь 30.06.09, № 75. – 138 с.

87. Основы оценки риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду / Г.Г. Онищенко, С.М. Новиков, Ю.А. Рахманин, С.Л. Авалиани, К.А. Уштуева. – М.: НИИ ЭЧ и ГОС, 2002. – 408 с.
88. Песенко Ю.А. Принципы и методы количественного анализа в фаунистических исследованиях. М.: Наука, 1982. – 287 с.
89. Похолков Ю.П., Чучалин А.И., Агранович Б.Л., Могильницкий С.Б. Модели рейтинга вузов и образовательных программ // Высшее образование в России, № 11, 2005. – С. 3 – 20.
90. Программа развития ООН: Развитие человеческого потенциала в регионах России в 2013 году. – Электр. рес. URL: http://gtmarket.ru/news/2013/06/17/6014 (01.06.16).
91. Программа развития ООН: Развитие человеческого потенциала в регионах России в 2010 году. – Электр. рес. URL: http://gtmarket.ru/news/state/2010/10/29/2715 (30.05.16).
92. Протасов А.А. Биоразнообразие и его оценка. Концептуальная диверсикология. – К.: Ин-т гидробиологии НАН Украины, 2002. – 105 с.
93. Р 2.1.10.19920-04. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. – М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004. – 143 с. – Электр. рес. URL: http://www.gosthelp.ru/text/r2110192004rukovodstvopoo.html (25.05.16).
94. РД 52.04.186-89. Руководство по контролю загрязнения атмосферы. – М.: Гос. ком. СССР по гидрометеорологии – Минздрав СССР, 1991. – 691 с.
95. Рекомендации по качеству воздуха в Европе. / Пер. с англ. – М.: Весь мир, 2004. – 312 с.
96. Розенберг Г.С., Шитиков В.К. О соотношении математики и биологии в экологии // Количественные методы экологии и гидробиологии / Отв. ред. чл.-корр. РАН Г.С. Розенберг. – Тольятти: СамНЦ РАН, 2005. – С. 228 – 233.
97. Российский совет по международным делам. Индексы и рейтинги. – Электр. рес. URL: http://russiancouncil.ru/spec/stat/index.php?active_id_10=33#top (10.06.16).

98. Российский совет по международным делам. Статистика. – Электр. рес. URL: http://russiancouncil.ru/spec/stat/index.php?active_id_10=33#top (10.06.16).
99. Руководство по разработке и использованию национальных индикаторов биоразнообразия / UNEP: Всемирный Центр Мониторинга Сохранения, Кембридж, Великобритания, 2011. – 40 с.
100. Салми Д., Сароян Э. Рейтинги и ранжирования как инструмент политики: политические аспекты экономической политики отчетности в высшем образовании // Высшее образование в Европе, № 1. 2007.
101. Салми Д. Создание университетов мирового класса. М.: Весь Мир. 2009. – 132 с.
102. Саноцкий И.В., Уланова И.П. Критерии вредности в гигиене и токсикологии при оценке опасности химических соединений. М.: Медицина, 1975. – 328 с.
103. Сафонов В.С., Одишария Г.Э., Швыряев А.А. Теория и практика анализа риска в газовой промышленности. – М.: Олита, 1996. – 207 с.
104. Сидоренков А.В. Методики социально-психологического изучения малых групп в организации: монография / А.В. Сидоренков, Е.С. Коваль, А.Л. Мон-друс, И.И. Сидоренкова, Н.Ю. Ульянова; под ред. А.В. Сидоренкова. Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального ун-та, 2012. – 244 с.
105. Смольянинов В.М., Русинов П.С., Панков Д.Н. Комплексная оценка антропогенного воздействия на природную среду при обосновании природоохранных мероприятий. – Воронеж: ВГАУ, 1996. – 126 с.
106. Справочное пособие по экологической оценке. Т. 1 – 3. World Bank, Washington, D.C., 1991.
107. Терехина А.Ю. Анализ данных методами многомерного шкалирования. – М.: Наука, 1986. – 168 с.
108. Тихомиров Н.П., Потравный И.М., Тихомирова Т.М. Методы анализа и управления эколого-экономическими рисками. – М.: Юнити-Дана. 2003. – 350 с.
109. Тишков А.А. 2007. Теория и практика сохранения биоразнообразия (к методологии охраны живой природы в России). – Электр. рес. URL: http://biodat.ru/doc/lib/tishkov2.htm (27.05.16).

110. Уиттекер Р. Сообщества и экосистемы. – М.: Прогресс, 1980. – 328 с.
111. Фомин Г.С., Фомина О.Н. Воздух. Контроль загрязнения по международным стандартам. Справочник. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Протектор, 2002. – 432 с.
112. Форрестер Дж. Мировая динамика. – М.: Наука, 1978 – 168 с.
113. Хоружая Т.А. Оценка экологической опасности. – М.: Книга-сервис, 2002. – 208 с.
114. Центр гуманитарных технологий. – Электр. рес. URL: http://gtmarket.ru/research/ (29.05.16).
115. Шитиков В.К., Розенберг Г.С. Оценка биоразнообразия: попытка формального обобщения // Количественные методы экологии и гидробиологии / Отв. ред. чл.-корр. РАН Г.С. Розенберг. – Тольятти: СамНЦ РАН, 2005. – С. 91 – 129.
116. Экологические показатели и основанные на них оценочные доклады. Восточная Европа, Кавказ и Центральная Азия. Нью-Йорк, Женева: ООН. 2007. – 110 с.
117. Эльсгольц Л.Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. – М.: Наука, 1969. – 424 с.
118. Энциклопедия «Животные» / Под ред. Д. Берни. – М.: Астрель, 2008. – 624 с.
119. Яйли Е.А. Научные и прикладные аспекты управления урбанизированными территориями на основе инструмента риска и новых показателей качества окружающей среды. С.-Пб: РГГМУ. – 206 с.
120. AnAge: The Animal Ageing and Longevity Database. – Available at: http://genomics. senescence.info/species/ (accessed May 25, 2016).
121. Archives re-analysis of climate data. – Available at: http://apps.ecmwf.int/ datasets/; http://nomads.ncdc.noaa.gov (accessed May 25, 2016).
122. Averin G.V., Zviagintseva A.V., Konstantinov I.S. and Ivashchuk O.A., 2015. Data Intellectual Analysis Means Use for Condition Indicators Assessment of the Territorial and State Formations. Research Journal of Applied Sciences, 10(8): 411–414. – Available at: http://medwelljournals.com/ abstract/?doi=rjasci.2015.411.414 (accessed May 27, 2016).
DOI: 10.3923/rjasci.2015.411.414.

123. Averin G.V., Zviagintseva A.V., Shevtsova M.V. and Kurtova L.N. Probabilistic methods of a complex assessment of quantitative information. Research Journal of Applied Sciences 11 (7): 415 – 418, 2016. – Available at: http://www.medwelljournals.com/abstract/?doi=rjasci.2016.415.418 (accessed August 05, 2016). DOI: 10.3923/rjasci.2016.415.418.
124. Better understanding our cities. The role of urban indicators. Lawrence R.J. Paris: Organisation for Economic Co-Operation and Development, 1997, 94 p.
125. Bliss C. The method of probits // Science V. 79, no. 2037, 1934. pp. 38 – 39. DOI: 10.1126/science.79.2037.38.
126. Briggs, David. Environmental Health Indicators: Framework and Methodologies. Geneva: Nene Centre for Research, University College Northampton, WHO. 1999, 119 p. – Available at: www.who.int/ ceh/publications/cehframework/en/ (accessed May 27, 2016).
127. Central Intelligence Agency (US). – Available at: https://www.cia.gov/ library/publications/ (accessed May 27, 2016).
128. Chapin F.S. III, Reynolds H.L., D'Antonio C.M. and Eckhart V.M.: 1996, 'The functional role of species in terrestrial ecosystems', in B. Walker and W. Steffen (eds.), Global change and terrestrial ecosystems, Cambridge University Press, pp. 403 – 428.
129. Economist Intelligence Unit: Safest Cities Index 2015. – Available at: http://gtmarket.ru/news/2015/01/26/7064 (accessed May 23, 2016).
130. European Community. Air Quality Standards. – Available at: http://ec.europa.eu/ environment/air/quality/standards.htm (accessed May 21, 2016).
131. European Green City Index. Assessing the environmental impact of Europe's major cities. A research project conducted by the Economist Intelligence Unit, sponsored by Siemens. Munich, Germany: Siemens AG, 2009, 100 p. – Available at: www.siemens.com/greencityindex (accessed May 23, 2016).
132. Freedom House. – Available at: http://freedomhouse.org/report/ (accessed May 20, 2016).
133. Gauch H.G. 1982. Multivariate Analysis in Community Ecology. Cambridge University Press, Cambridge, England, 298 p.

134. Global Biodiversity: Status of the Earth's Living Resources. 1992. World Conservation Monitoring Centre. London: Chaptman & Hall, 594 p.
135. Groombridge B., Jenkins M.D. 2000. Global Biodiversity. Earth s living resources in the 21st century. Cambridge: World Conservation Monitoring Center. Hoechst foundation, 247 p.
136. Guidelines for Ecological Risk Assessment / U.S. Environmental Protection Agency. Washington, DC, 1998, 188 p. – Available at: https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-11/documents/ eco_risk_assessment1998.pdf (accessed May 29, 2016).
137. Identification, Monitoring, Indicators and Assessment. – Available at: http://www.cbd.int/ indicators/intro.shtml (accessed May 20, 2016).
138. Indicators of Sustainable Development: Guidelines and Methodologies. – United Nations, New York, 2001, 310 p. – Available at: http://www.un.org/ esa/sustdev/publications/indisd-mg2001.pdf (accessed May 25, 2016).
139. Leakey R.E. 1996. The sixth extinction: biodiversity and its survival. Wiedenfeld & Nicolson. London, 271 p.
140. Manual of Industrial Hazard Assessment Techniques. 1985. Office of Environmental and Scientific Affairs, World Bank, Washington, DC, 188 p.
141. Mayr E. 1969. Principles of systematic zoology. New York, McGrow Hill Book Co, 428 p.
142. McIntosh R.P. 1967. An Index of Diversity and the Relation of Certain Concepts to Diversity // Ecology.Vol. 48, no. 3: 392 – 404.
143. Mercer Human resort Consulting. – Available at: http://www.mercerhr.com/ (accessed May 27, 2016).
144. Risk Assessment Methods. Approaches for Assessing Health and Environmental Risks. Vincent T. Covvello, Miley W. Merkhofer. New York: Plenum Press, 1993, 317 p.
145. Risk vs. Risk. Tradeoffs in Protecting Health and the Environmental. Edited by John D. Graham and Jonathan Baert Wiener. Cambridge, Massachusetts, London, England, 1995, 352 p.
146. Simpson G.G. 1961. Principles of animal taxonomy. New York, Columb. Univ. Press, 247 p.
147. The City Development Index (CDI) / The State of the World’s Cities. UNCHS (Habitat), 2001. pp. 116 – 119.

148. Toxicology and Risk Assessment. Principles, Methods, and Applications / edited by Anna M. Fan, Louis W. Chang. 1996. New York: Marcel Dekker, Inc., 859 p.
149. U.S. EPA. Guidance for Conducting Health Risk Assessment of Chemical Mixtures (External Scientific Peer Review Draft) NCEA-C-0148 // United States Environmental Protection Agency, National Centre for Environmental Assessment, Risk Assessment Forum, Washington DC, April 1999. – 148 p.
150. U.S. EPA. Human Health Evaluation Manual, Supplemental Guidance: Standard Default Exposure Factors. Publication 9285.6-03. Office of Emergency and Remedial Response, Washington, 1991.
151. Zviagintseva A.V. Biological diversity: the problem of modeling the distribution of species on the Earth // Materialy IX mezinarodni vědecko – prakticka konference “Moderni vymoženosti vědy – 2013”. – Dil 59. Biologicke vědy: Praha. Publishing House “Education and Science” s.r.o. Stran 12 – 20. 27 ledna – 05 unora 2013 roku. – Available at: http://www.rusnauka.com/ (accessed May 29, 2016).
152. Zviagintseva A.V. Multiparameter ranking of areas based on the analysis of data about the condition of natural and anthropogenic systems // Системный анализ и информационные технологии в науках о природе и обществе. – 2014. – №1(6) – 2(7). pp. 76 – 83. – Available at: http://sait.csm.donntu.org (accessed May 25, 2016).

Приложение А. Некоторые показатели и индикаторы для комплексной оценки природно-антропогенных и урбанизированных систем

№	Показатель или индикатор	Рекомендуемое значение
1	2	3
1. Инфраструктура и техногенная деятельность		
1.1	Площадь городской застройки, км^2; %	min
1.2	Доля городского населения от общей численности населения, %	опр. спец-ой задач
1.3	Темпы урбанизации, % годовых изменений	тоже
1.1 Удельные показатели озеленения территории промышленных городов		
1.4	Площадь насаждений общего пользования в расчете на одного жителя, м^2/чел.	не менее 16 – 22
1.5	Озелененность территории (площадь всех видов зеленых насаждений, отнесенная к площади города), %	45 – 60
1.6	Повреждение древостоев техногенными выбросами, %	менее 5
1.2 Показатели образования и использования отходов		
1.7	Накоплено опасных отходов, тыс. т	min
1.8	Образовано опасных отходов, т	тоже
1.9	Использовано отходов I-III классов опасности, т	max
1.10	Доля площади мест хранения бытовых и промышленных отходов (терриконы, свалки, полигоны), %	min
1.3 Показатели промышленных и транспортных зон		
1.11	Доля территорий опасных промышленных объектов I класса опасностии (СЗЗ 1000 м), %	min
1.12	Доля территорий промышленных групп с предприятиями I-III класса опасности (СЗЗ≥300 м), %	
1.13	Доля территорий промышленных групп с предприятиями VI-V класса опасности (от 50 м до 100 м СЗЗ), %	
1.14	Доля площади полос отвода автомобильных и железных дорог, %	тоже
1.15	Доля площади зашумленных территорий, %	-/-

Продолжение таблицы приложения А

1	2	3
	2. Социально-экономическая сфера	
2.1	Численность населения, тыс. чел.	опр. спец-ой задач
2.2	Плотность населения, чел./км^2	тоже
2.3	Территория, тыс. км^2	–
2.4	Валовый внутренний продукт на душу населения, $	max
2.5	Вклад секторов (промышленность, услуги, сельское хозяйство) в валовую добавленную стоимость, %	опр. спец-ой задач
2.6	Экспорт товаров, млрд. $	тоже
2.7	Импорт товаров, млрд. $	-/-
2.8	Инвестиции, млрд. $	-/-
2.9	Среднемесячная зарплата, $	–
2.10	Средний размер назначенных пенсий, $	> прожит. min
2.11	Демографическая нагрузка детьми и лицами пенсионного возраста на население трудоспособного возраста, чел. нетруд-го в-та/тыс. жителей труд-ого в-та	опр. спец-ой задач
2.12	Уровень безработицы, %	min
2.13	Уровень занятости инвалидов, %	max
2.14	Уровень инфляции (потребительские цены)	min
2.15	Средний уровень обеспеченности жильем, м^2/чел.	соц-ные нормы
	3. Здравоохранение и здоровье населения	
3.1	Коэффициент рождаемости, на тыс. чел.	max
3.2	Коэффициент смертности, на тыс. чел.	min
3.3	Старение населения, % населения старше 65 лет	–
3.4	Ожидаемая продолжительность жизни при рождении, лет (в том числе: мужчин, женщин)	max
3.5	Младенческая смертность (в возрасте до года), число умерших на тыс. родившихся живыми детей	min
3.6	Детская смертность (в возрасте от 1 до 4 лет), число умерших на тыс. родившихся живыми детей	тоже
3.7	Заболеваемость респираторными инфекциями в возрасте до 5 лет, число случаев на 100 тыс. детей	-/-
3.8	Заболеваемость кишечными инфекциями в возрасте до 5 лет, число случаев на 100 тыс. детей	-/-
3.9	Общая заболеваемость, чел. на тыс. населения	-/-
3.10	Коэффициент смертности от инфекционных и паразитарных болезней, на 100 тыс. чел.	-/-

Продолжение таблицы приложения А

1	2	3
3.11	Коэффициент смертности от новообразований, на 100 тыс. чел.	min
3.12	Коэффициент смертности от болезней системы кровообращения, на 100 тыс. чел.	тоже
3.13	Коэффициент смертности от болезней органов дыхания, на 100 тыс. чел.	-/-
3.14	Коэффициент смертности от болезней органов пищеварения, на 100 тыс. чел.	-/-
3.15	Уровень обеспеченности врачами, врачей на тыс. чел.	40 – 60
3.16	Расходы на здравоохранение, % ВВП	7 – 11
	4. Образование	
4.1	Средняя продолжительность обучения, лет	max
4.2	Ожидаемая продолжительность обучения, лет	тоже
4.3	Доля учащихся среди детей и молодежи в возрасте от 6 до 23 лет, %	-/-
4.4	Охват населения высшим и средним профессиональным образованием, %	-/-
4.5	Грамотность, %	-/-
4.6	Общие расходы на образование, % ВВП	3,5 – 5,5
	5. Жилищно-коммунальное хозяйство	
5.1	Удельный вес жилищного фонда, оборудованного водопроводом, %	город: >95 село: >50
5.2	Удельный вес жилищного фонда, оборудованного канализацией, %	город: >90 село: >40
5.3	Доля ветхого и аварийного жилищного фонда, %	<2
5.4	Потери воды, млн. $м^3$; %	min
	6. Производство и потребление	
6.1	Объем отгруженных товаров собственного производства, выполненных работ и услуг собственными силами, млн. $	опр. спец-ой задач
6.2	Использование внутренней добычи на душу населения, тонн/чел.	тоже
6.3	Сбор бытовых отходов на душу населения, кг/чел.	-/-
	7. Промышленность и энергетика	
7.1	Общее потребление энергии (в тоннах нефтяного эквивалента на душу населения), т н.э./чел.	опр. спец-ой задач

Продолжение таблицы приложения А

1	2	3
7.2	Конечное потребление энергии, т н.э./чел.	опр. спец-ой задач
7.3	Потребление электроэнергии, ГВт-час	тоже
7.4	Доля возобновляемых ресурсов в общем потреблении энергии, %	15 – 20
7.5	Доля электричества, получаемого из ископаемого топлива, %	опр. спец-ой задач
7.6	Потребление тепловой энергии, млн. Гкал	тоже
7.7	Использование каменного угля, млн. т; %	-/-
7.8	Использование природного газа, млрд. $м^3$; %	-/-
7.9	Использование нефтепродуктов, тыс. т; %	-/-
7.10	Количество экспортируемой и импортируемой электроэнергии, ГВт-час	-/-
7.11	Энергоемкость ВВП (ВРП), т.у.т./тыс. $	0,20 – 0,40
7.12	Истощение энергетических ресурсов, % ВВП (ВРП)	min
	8. Транспорт	
8.1	Пассажирооборот (общее количество пассажиро-километров)	опр. спец-ой задач
8.2	Грузооборот (количество тонно-километров)	тоже
8.3	Количество легковых автомобилей на тыс. чел., ед.	-/-
8.4	Количество дорожно-транспортных происшествий на тыс. чел. (общее и по категориям «последствий» (смертельные случаи и травмы))	min
	9. Сельское хозяйство	
9.1	Сельскохозяйственные земли, % от общей площади земли	опр. спец-ой задач
9.2	Площадь выведенных из сельхозоборота земель вследствие их деградации, % от общей площади сельхозугодий	до 5 %
9.3	Использование органических удобрений на гектар сельскохозяйственных земель, т/га	9 – 10
9.4	Использование минеральных удобрений на гектар сельскохозяйственных земель, кг/га	не < 30
9.5	Использование пестицидов на гектар сельскохозяйственных земель, кг/га	регламентиру-емые нормы
9.6	Орошаемые земли, % от общей площади сельскохозяйственных земель	опр. спец-ой задач

Продолжение таблицы приложения А

1	2	3
9.7	Гибель посевов, % от общей площади	менее 5
	10. Безопасность граждан	
10.1	Уровень преступности (количество преступлений на 10 тыс. чел.)	min
10.2	Показатель убийств на 100 тыс. чел.	тоже
10.3	Показатель ограблений на 100 тыс. чел.	-/-
10.4	Жертвы нападения, %	-/-
10.5	Количество беженцев, тыс. чел.; %	-/-
	11. Качество атмосферного воздуха	
11.1	Общий объем выбросов на единицу ВВП, тыс. т/млрд. $	min
11.2	Выбросы загрязняющих веществ от стационарных источников, тыс. тонн	Национальное предельное значение выбросов
11.3	Выбросы загрязняющих веществ от передвижных источников, тыс. тонн	
11.4	Доля субъектов предпринимательской деятельности, осуществляющих выбросы от стационарных источников, %	опр. спец-ой задач
11.5	Удельные выбросы вредных веществ, кг/чел.; тонн/км^2	min
11.6	Уровень загрязнения атмосферного воздуха основными поллютантами (диоксидом азота, пылью, диоксидом серы, оксидом углерода, формальдегидом, бенз(а)пиреном), доли ПДК$_{с.с.}$	не более 1
	12. Водопользование и качество вод	
12.1	Доля площади водных пространств в общей территории региона (города), %	–
12.2	Показатели загрязнения водных объектов (БПК$_5$, фосфаты, нитраты, соли аммония)	экологические нормативы
12.3	Забор воды из природных источников, млн. м^3; % по отношению к запасам пресных вод	min
12.4	Использование свежей пресной воды на одного жителя в день, л	–
12.5	Повторное и оборотное использование пресной воды, млн. м^3	экономически эффективное

1	2	3
12.6	Сброс сточных вод по категориям загрязнения в поверхностные водные объекты, млн. $м^3$	min
12.7	Безвозвратное изъятие объема поверхностного стока, %	не более 20%
12.8	Процент населения, имеющего доступ к улучшенным источникам воды, %	100
13. Природа и биоразнообразие		
13.1	Лесистость территории (доля лесов и лесопокрытых территорий в общей площади), %	20 – 40
13.2	Доля площади охраняемых и заповедных объектов, %	6 – 15 и более
13.3	Доля площади ненарушенной хозяйственной деятельностью территорий, %	опр. спец-ой задач
13.4	Площадь (доля) фактической рубки лесов, га (%)	тоже
13.5	Лесовосстановление на землях лесного фонда, га (%)	max
14 Показатели качества ландшафтов и почв		
14.1	Доля деградированных территорий (просадки земной поверхности, оползни, сели, карсты), %	min
14.2	Доля подтапливаемых территорий, %	тоже
14.3	Доля затопленных территорий, %	-/-
14.4	Расчлененность территории оврагами, балками, м/$км^2$.	-/-
14.5	Доля земель, подлежащих реабилитации, %	экономически эффективное
14.6	Доля площади территории с почвами, загрязненными свыше норм, %	min
14.7	Уровень загрязнения почв основными поллютантами (бенз/а/пиреном, свинцом, ртутью, нефтепродуктами и нефтью), доли ПДК	не более 1
15. Изменения климата		
15.1	Выбросы озоноразрушающих веществ (ОРВ), кг/чел. Общее потребление агрегированных ОРВ	техн. регл., нормы
15.2	Общее кол-во агрегированных выбросов парниковых газов на душу населения (тонн CO_2-экв./чел.), в том числе:	тоже
15.3	- выбросы диоксида углерода (CO_2);	-/-

Продолжение таблицы приложения А

1	2	3
15.4	- выбросы метана (CH_4);	техн. регл., нормы
15.5	- выбросы закиси азота (N_2O)	тоже
15.6	Выбросы парниковых газов от энергетических отраслей, тонн CO_2-экв./чел., %	-/-
15.7	Выбросы парниковых газов от транспорта, тонн CO_2-экв./чел., %	-/-
15.8	Выбросы парниковых газов от промышленных процессов, тонн CO_2-экв./чел., %	-/-
15.9	Выбросы парниковых газов от сельского хозяйства, тонн CO_2-экв./чел., %	-/-

опр. спец-ой задач – определяется исходя из специфики задач;
min – минимальное значение в группе;
max – максимальное значение в группе;
техн. регл. – в соответствии с действующими технологическими регламентами;
нормы – в соответствии с международными нормативами;
прожит. min – прожиточный минимум;
национ. нормы – национальные нормы;
-/- – соответствует предыдущей записи данного столбца.
соц-ные нормы – социальные нормы площади жилья, установленные в соответствии с законодательством, нормативно-правовыми актами и градостроительными нормативами (в РФ ≥ 20 м^2/чел.)

Следует отметить, что подбор индикаторов должен осуществляется для каждого случая отдельно в зависимости от направленности исследований (например, для оценки экологической обстановки территорий с целью выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия; для оценки состояния селитебных территорий (территорий рекреационного назначения); для ранжирования стран и регионов по уровню социально-экономического развития и т.д.).

Для каждого конкретного случая подбирается определенная группа индикаторов, наиболее полно отражающая состояние и поведение изучаемого объекта (группы объектов одного класса). Вывод о качестве состояния, а также интенсивности и направленности развитии объекта (группы объектов одного класса) делается на основе сопоставления фактических значений индикативных показателей объекта с соответствующими им нормативными или рекомендуемыми значениями критериев, выработанных для конкретных случаев и исходя из специфики решаемых задач.

Приложение Б. Краткое описание алгоритмов определения статистической вероятности событий

Пример алгоритма по определению статистической вероятности событий для программного продукта Statistica дан ниже. Аналогичные алгоритмы приведены также в литературе [5, 7], а также необходимые инструменты имеются в меню Статистики программного продукта Statistica и других аналогичных средствах статистической обработки данных. Скрипт для определения статистической вероятности совместных событий одновременного наблюдения двух показателей в Visual Basic имеет вид.

```
Sub Main
'Получаем лист с переменными
Dim s As Spreadsheet
Set s = ActiveSpreadsheet
'Получаем длину переменных
Dim length,d,vars As Integer
length = s.Cases.Count
vars = 2
d=1
'Создаём массив для хранения переменных из сетки
Dim var() As Double
ReDim var(vars,length)
'Переписываем в массив ячейки переменных из сетки
For i=1 To vars
  For j=1 To length
        var(i-1,j-1) = s.Cells(j,i)
  Next j
Next i
'Максимумы и минимумы переменных
Dim minVar(),maxVar() As Double
ReDim minVar(vars)
ReDim maxVar(vars)
```

```
For i=0 To vars-1
 minVar(i)=var(i,0)
 maxVar(i)=var(i,0)
 For j=1 To length-1
        If(var(i,j)<minVar(i)) Then
                minVar(i) = var(i,j)
        End If
        If(var(i,j)>maxVar(i)) Then
                maxVar(i) = var(i,j)
        End If
 Next j
Next i
'Длины отрезков, количество отрезков
Dim delta(),K As Double
ReDim delta(vars)
K=15
For i=0 To vars-1
 delta(i) = (maxVar(i)-minVar(i))/K
Next i
'Массив границ
Dim bound() As Double
ReDim bound(vars,K+1)

For i=0 To vars-1
 bound(i,0) = minVar(i)
 bound(i,K) = maxVar(i)
Next i
'Заполнение массива границ
For i=0 To vars-1
 For j=1 To K-1
        bound(i,j) = minVar(i) + delta(i)*j
 Next j
Next i
```

```
'Вычисление ver_Emp
Dim ver_Emp As Double
ReDim verEmp(K,K)
Dim p As Boolean

For i=1 To K
 For j=1 To K
 verEmp(i-1,j-1)=0
        For h=0 To length-1
        p=False
            If j<>K And i<>K Then
                If var(0,h) < bound(0,i) And var(1,h) < bound(1,j) Then
                    p=True
                End If
            End If

            If i=K And j<>K Then
                If var(0,h) <= bound(0,i) And var(1,h) < bound(1,j)
Then
                    p=True
                End If
            End If

            If i<>K And j=K Then
                If var(0,h) < bound(0,i) And var(1,h) <= bound(1,j)
Then
                    p=True
                End If
            End If

            If i=K And j=K Then
                If var(0,h) <= bound(0,i) And var(1,h) <= bound(1,j)
Then
                    p=True
```

```
                End If
            End If

            If p Then
                verEmp(i-1,j-1)=verEmp(i-1,j-1)+1
            End If
        Next h
    Next j
Next i
'Обновляем сетку
For i=0 To K-1
  For j=0 To K-1
        d= i*K + (j+1)
        'nn
        s.Cells(d,3) = verEmp(i,j)
        'ver_emp
        s.Cells(d,4) = verEmp(i,j)/length
        'ver_geom
        s.Cells(d,5) =
(bound(0,i+1)*bound(1,j+1))/(bound(0,K)*bound(1,K))
  Next j
Next i

For i=K*K+1 To length
  s.Cells(i,3)=-9999
  s.Cells(i,4)=-9999
  s.Cells(i,5)=-9999
Next i

End Sub
```

Аналогично можно определить статистическую вероятность совместных событий наблюдения нескольких показателей.

ЗВЯГИНЦЕВА АННА ВИКТОРОВНА,

канд. техн. наук., доцент.

Родилась 13 марта 1977 г. в городе Макеевка Донецкой области. В 1999 году закончила факультет экологии и химической технологии по специальности «Экология и охрана окружающей среды», в 2007 году получила квалификацию магистра программного обеспечения автоматизированных систем в Донецком национальном техническом университете (ДонНТУ) http://masters.donntu.org/2007/fvti/z/zviaginseva/index.htm.

В 1999 – 2002 гг. работала инженером НТЦ «Реактивэлектрон» НАН Украины (г. Донецк), с 2002 года – преподавателем в ДонНТУ. В 2006 году защитила кандидатскую диссертацию по специальности «Экологическая безопасность», направление исследований связано с оценкой экологических рисков. С 2007 года – доцент кафедры компьютерных систем мониторинга факультета компьютерных наук и технологий ДонНТУ, с марта 2015 года – докторант ДонНТУ, в настоящее время работает над диссертацией в лаборатории Прикладного системного анализа и информационных технологий Белгородского национального исследовательского университета. Научная работа связана с развитием теории комплексной оценки состояния урбанизированных территорий на основе интеллектуального анализа индикативных показателей, руководитель – проф. Аверин Г.В.

Является ответственным редактором журнала «Системный анализ и информационные технологии в науках о природе и обществе».

Автор около 80 научных публикаций, в том числе 4 монографий. Научные интересы: системный анализ экологических и социально-экономических процессов, теория опасности и риска, экологический мониторинг и безопасность техногенных систем, методы интеллектуального анализа данных.

Более подробная информация на сайте: http://csm.donntu.org/

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

Звягинцева Анна Викторовна

ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МЕТОДЫ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ПРИРОДНО-АНТРОПОГЕННЫХ СИСТЕМ

Научный редактор д.т.н., проф. Аверин Геннадий Викторович

ISBN 978-5-4442-0120-6

Сдано в набор 05.08.2016 г.
Подписано в печать 08.09.2016 г. Формат 60×90/16.
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 16,0. Уч.-изд. л. 15,8.
Тираж 1000 экз. Заказ 247.

ООО «Издательский дом «Спектр»
119048, Москва, ул. Усачева, д. 35, стр. 1.
http://www.idspectr.ru. E-mail: idspectr@rambler.ru

Отпечатано в типографии ИД «Белгород» НИУ «БелГУ»
308015, Белгород, ул. Победы, д. 85. Тел.: 30-14-48