



ИЗУМРУДНЫЕ  
ГОРОДА

БЕСПАЛОВА С.В., ЗВЯГИНЦЕВА А.В.,  
РОМАНЧУК С.М., ЧУФИЦКИЙ С.В.

# КОМПЛЕКСНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПРИ МОНИТОРИНГЕ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ И ГОРОДСКИХ АГЛОМЕРАЦИЙ



**С.В. Беспалова, А.В. Звягинцева,  
С.М. Романчук, С.В. Чуфицкий**

**КОМПЛЕКСНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ  
ПРИ МОНИТОРИНГЕ  
УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ  
И ГОРОДСКИХ АГЛОМЕРАЦИЙ**

Донецк, 2025

УДК 504.064.36:574:53.083.91

ББК Б18+Ж10в67в631

К63

*Рекомендовано к печати Ученым советом*

*Донецкого государственного университета (протокол №11 от 01.10.2024 г.)*

**Рецензенты:**

**Глухов А.З.** – главный научный сотрудник Донецкого ботанического сада, д-р биол. наук, проф., член-корр. НАНУ;

**Милославский А.Г.** – профессор кафедры теоретической физики и нанотехнологий Донецкого государственного университета, д-р физ.-мат. наук, проф.;

**Сердюк А.И.** – профессор кафедры техносферной безопасности Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, д-р хим. наук, проф.

**Беспалова С.В., Звягинцева А.В., Романчук С.М., Чуфицкий С.В.**

**К63 Комплексные измерения при мониторинге урбанизированных территорий и городских агломераций / Монография. – 2-е изд., перераб. и доп. – Донецк: Изд-во ДонГУ, 2025. – 349 с.**

**ISBN 978-5-00262-007-4**

Изучены проблемы комплексной оценки урбанизированных территорий и городских агломераций на основе обобщения различных эмпирических и статистических данных. Содержится изложение теоретических и экспериментальных основ комплексных измерений при интегральной оценке состояний городских и территориальных объектов. Предложены варианты измерительных систем для мониторинга и оценки состояния природных поверхностных вод с использованием методов биомониторинга и средств оперативного контроля.

Монография предназначена для научных работников, специалистов и преподавателей, занимающихся исследованиями в области мониторинга и анализа состояния окружающей среды.

**Bespalova S.V., Zviagintseva A.V., Romanchuk S.M., Chufitskiy S.V.**

**Integrated measurements in monitoring urbanized areas and urban agglomerations. Monograph. 2nd Edition, Revised and Expanded. Donetsk, DonGU Publishing House, 2025, 349 p.**

The problems of a comprehensive assessment of urban areas and urban agglomerations are studied based on a generalization of various empirical and statistical data. The paper presents theoretical and experimental bases of complex measurements for integral assessment of urban and territorial objects' states. The variants of measurement systems for monitoring and assessment of natural surface water conditions using biomonitoring methods and operational control means are proposed.

*Работа выполнена за счет средств госбюджетной темы «Разработка интеллектуальных систем анализа и прогнозирования состояния природно-технических объектов» (регистрационный номер 1023030900052-5-1.2.1;2.8.3;2.2.3).*

**ISBN 978-5-00262-007-4**

© Беспалова С.В., Звягинцева А.В.,  
Романчук С.М., Чуфицкий С.В., 2025

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	9
ГЛАВА 1. ПРОБЛЕМЫ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ И АНАЛИЗА СОСТОЯНИЙ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ И ГОРОДСКИХ АГЛОМЕРАЦИЙ.....	22
1.1 Урбанизированные территории и их характеристика.....	23
1.2 Существующая методология комплексной оценки.....	35
1.3 Оценка рисков и системные модели в комплексной оценке.....	50
1.4 Урбанизированные территории и городские агломерации как объекты наблюдения и статистического учета.....	58
1.4.1 Мировые процессы урбанизации.....	58
1.4.2 Город как система и урбанизированная территории.....	77
1.4.3 Проблема измеримости состояний урбанизированных систем.....	86
1.4.4 Комплексная оценка как инструмент стратегического планирования.....	92
1.5 Выводы и некоторые актуальные задачи комплексной оценки	104
ГЛАВА 2. ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ПРИРОДНЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ.....	114
2.1 Биомониторинг состояния поверхностных вод русла реки Кальмиус с применением методов флуориметрии.....	114
2.1.1 Оценка содержания фотосинтетических пигментов в исследуемых мониторинговых точках.....	122
2.1.2 Регистрация световых кривых флуоресценции хлорофилла.....	137
2.1.3 Регистрация кривых индукции флуоресценции хлорофилла.....	154

2.2	Биотестирование токсичности проб воды реки Кальмиус на культурах фитопланктона с применением методов флуориметрии	160
2.2.1	Оценка содержания хлорофилла и скорости роста тест-культуры <i>Chlorella sorokiniana</i> .....	162
2.2.2	Регистрация световых кривых флуоресценции тест-культуры <i>Chlorella sorokiniana</i> .....	171
2.2.3	Регистрация кривых индукции флуоресценции тест-культуры <i>Chlorella sorokiniana</i> .....	178
ГЛАВА 3.	ИНТЕГРИРОВАННАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЙ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ МОНИТОРИНГА.....	195
3.1	Основные понятия и используемые принципы.....	196
3.2	Выбор эмпирических мер и моделей пространства состояний...	208
3.3	Интегрированная оценка состояний объектов и построение измерительных шкал.....	216
3.4	Математические зависимости и критерии для описания состояний и процессов развития урбанизированных территорий	225
3.5	Методика комплексных измерений и анализа состояний сложных систем.....	231
3.6	Разработка алгоритмов оценки параметров урбанизированных территорий.....	235
3.7	Примеры комплексной оценки состояний систем и объектов...	241
ГЛАВА 4.	ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ.....	261
4.1	Флуориметрическая система, основанная на принципах метода Pulse amplitude modulation (РАМ).....	261
4.1.1	Структурная схема макета флуориметра.....	262
4.1.2	Оптический блок макета флуориметра.....	264

4.2	Флуориметрическая система, основанная на принципах метода Fast repetition rate (FRR).....	268
4.2.1	Структурная схема макета флуориметра.....	269
4.2.2	Конструктивная реализация макета флуориметра.....	270
4.3	Электромагнитный измерительный преобразователь скорости электропроводящей жидкости.....	272
4.4	Автономная станция сбора и передачи информации.....	274
4.5	Алгоритм функционирования модуля сбора информации.....	276
Глава 5.	ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ ПРОСТРАНСТВЕННО-РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ	278
5.1	Информационные технологии мониторинга режимов работы водораспределительной сети.....	278
5.2	Архитектура интеллектуальной системы мониторинга режимов работы водораспределительной сети.....	282
5.3	Автономный комплекс контроля технологических параметров.	288
5.4	Построение моделей режимов работы водораспределительных сетей с использованием методов машинного обучения.....	290
5.4.1	Особенности построения моделей режимов работы водораспределительных сетей с помощью гребневой и лассо-регрессий.....	292
5.4.2	Особенности построения моделей режимов работы водораспределительных сетей на основе ансамблей классификаторов и нейросетевого подхода.....	305
	СПИСОК ИСТОЧНИКОВ.....	310
	ПРИЛОЖЕНИЕ А. Некоторые показатели и индикаторы для комплексной оценки урбанизированных территорий.....	337
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Макрос и пользовательские функции на VBA, реализующие алгоритм выбора эталонного процесса при описании процессов развития объектов.....	346

## CONTENTS

PREFACE.....	9
CHAPTER 1. PROBLEMS OF INTEGRATED ASSESSMENT OF URBANIZED TERRITORIES AND URBAN AGGLOMERATIONS.....	22
1.1 Urbanised areas and their characteristics.....	23
1.2 Existing integrated assessment methodology.....	35
1.3 Risk assessment and system models in integrated assessment.....	50
1.4 Urbanised areas and urban agglomerations as objects of observation and statistics .....	58
1.4.1 Global urbanization processes.....	58
1.4.2 The city as a system and urbanized area .....	77
1.4.3 The problem of measurability of states of urbanized systems.....	86
1.4.4 Comprehensive assessment as a strategic planning tool.....	92
1.5 Conclusions and some current challenges related to integrated assessment.....	104
CHAPTER 2. ASSESSMENT OF THE STATE OF NATURAL SURFACE WATERS OF THE URBAN ENVIRONMENT .....	114
2.1 Biomonitoring of surface water conditions in the Kalmius riverbed using fluorimetry methods.....	114
2.1.1 Estimation of photosynthetic pigments content in the studied monitoring points.....	122
2.1.2 Registration of chlorophyll fluorescence light curves.....	137
2.1.3 Registration of chlorophyll fluorescence induction curves....	154

2.2 Biotesting of toxicity of Kalmius River water samples on phytoplankton cultures by fluorimetry methods.....	160
2.2.1 Assessment of chlorophyll content and growth rate of <i>Chlorella sorokiniana</i> test culture.....	162
2.2.2 Registration of fluorescence light curves of <i>Chlorella sorokiniana</i> test culture .....	171
2.2.3 Registration of fluorescence light curves of <i>Chlorella sorokiniana</i> test culture.....	178
CHAPTER 3. INTEGRATED ASSESSMENT OF URBANIZED AREAS BASED ON MONITORING DATA.....	195
3.1 Basic concepts and principles used.....	196
3.2 Selection of empirical indicators and models of the state space.....	208
3.3 Integrated assessment of object states and construction of measurement scales.....	216
3.4 Mathematical dependencies and criteria for describing the states and processes of development of urbanized territories.....	225
3.5 Methodology of complex measurements and analysis of states of complex systems.....	231
3.6 Development of algorithms for estimating the parameters of urbanized territories.....	235
3.7 Examples of a comprehensive assessment of the state of systems and facilities.....	241
CHAPTER 4. HARDWARE-SOFTWARE COMPLEX FOR MONITORING THE CONDITION OF WATER BODIES.....	261
4.1 A fluorimetric system based on the principles of the pulse-amplitude modulation method (PAM).....	261
4.1.1 Structural diagram of the fluorimeter location.....	262
4.1.2 Optical unit of the fluorimeter layout.....	264

4.2 Fluorimetric system based on the principles of the Fast repetition rate method (FRR).....	268
4.2.1 Block diagram of the fluorimeter layout .....	269
4.2.2 Optical block of the fluorimeter layout.....	270
4.3 Electromagnetic measuring transducer of electrically conductive fluid velocity .....	272
4.4 Autonomous data collection and transmission station.....	274
4.5 The algorithm of the data collection module.....	276
CHAPTER 5. HARDWARE-SOFTWARE COMPLEX FOR MONITORING THE STATUS OF TECHNOGENIC SPATIALLY DISTRIBUTED WATER BODIES.....	278
5.1 Information technologies for monitoring the operation modes of water distribution network.....	278
5.2 Architecture of intelligent monitoring system for operating modes of water distribution network.....	282
5.3 Autonomous control system for technological parameters.....	288
5.4 Development of models of operating modes of water distribution networks using machine learning methods .....	290
5.4.1 Features of constructing models of operating modes of water distribution networks using ridge and lasso regressions.....	292
5.4.2 Features of constructing models of operating modes of water distribution networks based on ensembles of classifiers and neural network approach.....	305
BIBLIOGRAPHY .....	310
APPENDIX A. Some indicators for a comprehensive assessment of urbanized areas territories .....	337
APPENDIX B. Macros and user-defined functions in VBA that implement the algorithm for selecting a reference process when describing the processes of object development.....	346

## PREFACE

*'We measure today  
for sustainable development tomorrow.'*

Motto of World Metrology Day 2024

The monograph focuses on a number of topical issues related to the collection, analysis, processing and generalization of various empirical and statistical data. It sets out the theoretical and experimental foundations of complex measurements in the integrated assessment of the conditions of urban and territorial objects. This research area is becoming more relevant for urbanized territories everyday because natural systems under the influence of anthropogenic influence turn into naturally anthropogenic, and their natural balance is irreversibly disrupted.

Considering the issues of sustainability and optimization of urbanized territories, it is very important to have a system of quantitative assessments and characteristics of the studied processes and to know the qualitative and quantitative characteristics of the abiotic and biotic elements of the respective territories. This monograph is devoted to complex measurements and assessments in order to determine the quality of urbanized territories and urban agglomerations.

Comprehensive assessment of the state of complex systems belongs to the field of systems sciences and is based on the analysis of a data set, obtained as a result of observations on the development, functioning or behavior of a particular system. One of the current field of this science is related to the development of natural scientific research methods, assessment and forecasting of environmental, natural-technical and socio-economic systems. The scientific and applied results of this work are devoted to the presentation of integrated measurement methods used in monitoring urbanized territories and urban agglomerations. The proposed approach can be used to solve problems in the field of urbanism, regionalism, global studies, environmental protection, national and environmental security as well as in various systemic and predictive studies.

The monograph examines a number of issues related to the comprehensive assessment of urbanized territories based on the generalization of various empirical monitoring data. The main content of the book is a systematic presentation of the results obtained by the team of authors, and is aimed at developing a new direction in urbanism related to complex measurements of system states.

The monograph contains five chapters.

The first chapter summarizes the basic concepts of natural and anthropogenic systems, urbanized territories, and urban agglomerations, their characteristics are presented and classes of objects of the corresponding systems are allocated which are subject to mandatory study and control. Global trends in urbanization processes are described, and the main problems of the measurability of the states of urbanized systems are indicated. The existing methodology of integrated assessment and risk assessment is presented, as well as the system models used in this field are described. It is demonstrated that the analysis of observational and measurement data on the state and development processes of urbanized territories makes it possible to identify patterns in the dynamics of urbanization, to study cities as complex urban planning and socio-economic systems and to present them as objects of strategic planning. Urbanized territories and urban agglomerations are considered as objects of observation and statistical accounting. In turn, a typical city is presented as a complex spatially distributed system and an urbanized territory. Its structural and functional scheme is given, a matrix of dependencies between the functions of the city and its subsystems is constructed, the structures of the main subsystems of the city in the form of various hierarchical, mixed and network structures are given, and their brief characteristics are presented. The chapter also describes the databases used for municipal indicators and observational databases for monitoring and operational control of various indicators which are conducted by departmental subjects of urban monitoring. The possibility of constructing measuring scales in a multidimensional space of indicators for

assessing the conditions of objects of the studied class is considered. The chapter ends with a presentation of integrated assessment as a strategic planning tool, conclusions, and some relevant tasks in this area.

The second chapter describes methods of studying the state of natural surface waters of the urban environment, summarizes the patterns of biomonitoring processes using fluorimetry methods. Methods of biotesting the toxicity of water samples on phytoplankton cultures using fluorimetry are considered. The assessment of the state of natural surface waters of the urban environment is given, in particular, the processes of biomonitoring the surface waters of the Kalmius riverbed and biotesting the toxicity of its water samples are described. The results are presented in the form of graphs and tables. It is shown that the obtained biotesting data confirm the results of the monitoring, provide an opportunity to get a more complete picture of the state of bioindicator organisms placed in the conditions of the studied aquatic environment, and significantly expand the possibilities of determining the quality of water resources. The informative information in the chapter is devoted to illustrating practical methods of complex measurements in relation to one of the most complex natural environments in urbanized territories.

The third chapter is devoted to the development of theoretical and experimental methods of integrated measurements. In particular, the methods of integrated assessment of the state of urbanized territories based on monitoring data are touched upon, the possibilities of using models based on empirical and statistical data are presented. The chapter also provides basic concepts and principles used, the choice of empirical measures and models of the state space is described, the methodology of integrated assessment of the conditions of objects and the procedure for constructing measuring scales are presented. Mathematical dependencies and criteria for analyzing the conditions and processes of development of urbanized territories, methods of integrated measurements and analysis of system states, developed algorithms for estimating the parameters of urbanized territories, etc. are given. Practical

examples of integrated assessment of the conditions of objects and methods for constructing measuring scales applied to several types of different systems are given here.

The following chapters are devoted to the development of hardware and software packages for monitoring the condition of water bodies.

The fourth chapter presents implemented information and measurement systems for monitoring the state of natural surface waters using biomonitoring methods and operational automated control tools. In particular, the developed software and hardware systems for monitoring the condition of water bodies are described, a fluorimetric system based on the principles of the Pulse amplitude modulation method and the Fast repetition rate method is presented. One- and two-component electromagnetic liquid flow velocity meters developed by the authors, as well as an autonomous information collection and transmission station, are described. The algorithm of the information collection module functioning is formulated.

The fifth chapter is devoted to the software and hardware systems for monitoring the state of man-made spatially distributed water bodies. It presents the architecture of an intelligent monitoring system for the operation of a water distribution network, an autonomous control system for technological parameters is described, the models of operating modes obtained on the basis of machine learning methods, in particular, models of operating modes of water distribution networks. The features of model construction are described, the final data are presented in the form of graphs and tables.

The list of the main infrastructural, ecological, socio-economic, industrial, climatic and other indicators and indicators used in the comprehensive assessment of urbanized territories and agglomerations is compiled in the form of a table and is given in the appendix. It also includes a Macro and user-defined VBA functions that implement an algorithm for selecting a reference process when describing the processes of object development.

The advantage of the monograph is that the proposed approaches to the processing and analysis of empirical and statistical data, algorithms for estimating urbanized territories based on a set of parameters, as well as the developed systems of integrated measurements can be used to describe and predict the behavior of various complex systems. In integrated measurements, it is possible to simultaneously study various indicators of systems that differ qualitatively from each other.

Precisely for the purpose to show the universality of the proposed methods, the monograph presents practical examples on the integrated assessment of urbanized territories and the construction of measuring scales, the establishment of mathematical dependencies and criteria for analyzing states and processes of their development. For example, a comprehensive assessment of urbanized territories (Russian cities) has been carried out, an example of an analysis of the socio-economic development of the subjects of the Russian Federation is given, an assessment of the state of housing and communal services in Russian cities is presented, the processes of land use in the countries of the world, etc. have been studied. Particular attention is paid to the way heterogeneous parameters reflecting the environmental, economic and social characteristics of the territory are combined into integral criteria based on a common approach to environmental assessment and analysis.

The authors would like to express their sincere gratitude to Professor Averin G.V., Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Computer Technology at Donetsk State University (DonSU), for his assistance in preparing the third chapter of the monograph and also for consultations, debates and discussions that allowed us to delve deeper into the problem of comprehensive assessment of complex systems as an interdisciplinary field of science.

Special thanks to the reviewers, professors A.Z. Glukhov, A.G. Miloslavsky and A.I. Serdyuk, who undertook the hard work of reviewing the manuscript of the monograph. The authors also express their appreciation to the

staff of the Department of Biophysics and Computer Technology at DonSU, who provided comprehensive support in the preparation of this monograph. Special thanks to the graduate of the Faculty of Physics and Technology of DonSU, Master V.V. Shcherbinin, for the idea, design and design of the cover of this monograph.

The authors hope that the monograph will be of interest to specialists involved in the development of information and control systems, research in the field of system analysis, monitoring and assessment of the environment and urbanized areas, and that this work will contribute to improving integrated measurement processes in order to achieve the goals of sustainable and balanced development.

2025 marks the 150th anniversary of the signing of the Metric Convention in 1875 by the countries of the world. The current motto of World Metrology Day 2025 is "*Measurements for all times, for all peoples*". For this reason, the title of the monograph, beginning with the words "*Integrated measurements*", in our opinion, reflects this motto and the main methodological concept of the authors of this study.

"Exact science is inconceivable without measure," noted Dmitri Ivanovich Mendeleev. The authors of the monograph believe that today the main problem of analyzing the processes of development of natural, technical, socio-economic and ecological systems is related precisely to answering the fundamental question: "What should be a comprehensive measure in assessing the state of such systems?" The answer to this question will make it possible to transform integrated assessment into an accurate and objective science. The authors hope that they have been able to make a feasible contribution to solving this problem, that will be supporters of their proposed approach and that the monograph will be accepted with interest by specialists

## ПРЕДИСЛОВИЕ

*«Мы измеряем сегодня  
для устойчивого развития завтра»*

Девиз Всемирного дня метрологии 2024

Предлагаемая вниманию читателя монография затрагивает в своей основе круг актуальных идей, связанных со сбором, анализом, обработкой и обобщением различных эмпирических и статистических данных. В монографии изложены теоретические и экспериментальные методы комплексных измерений при интегральной оценке состояний городских и территориальных объектов. Соответствующее направление исследований с каждым днем становится все более актуальным для урбанизированных территорий, где природные системы под воздействием антропогенного влияния превращаются в природно-антропогенные, а их естественное равновесие необратимо нарушается.

Рассматривая вопросы устойчивости и сбалансированности урбанизированных территорий, очень важно располагать системой количественных оценок и характеристик изучаемых процессов, а также знать качественные и количественные характеристики абиотических и биотических элементов соответствующих территорий. Комплексным измерениям и оценкам с целью определения качества урбанизированных территорий и городских агломераций и посвящена данная монография.

Комплексная оценка состояний сложных систем относится к области системных наук и основывается на анализе совокупности данных, полученных в результате наблюдений за развитием, функционированием или поведением той или иной системы. Одно из актуальных направлений данной науки связано с развитием естественнонаучных методов исследования, оценки и прогнозирования состояний экологических, природно-технических и социально-экономических систем. Научные и прикладные результаты данной работы посвящены изложению методов

комплексных измерений, используемых при мониторинге урбанизированных территорий и городских агломераций. Предлагаемый подход может быть использован при решении задач в сфере урбанистики, регионалистики, глобалистики, охраны окружающей среды, национальной и экологической безопасности, а также при различных системных и прогнозных исследованиях.

Основное содержание данной книги – систематическое изложение результатов, полученных коллективом авторов. Исследования носят комплексный характер и направлены на развитие нового направления в урбанистике, связанного с комплексными измерениями состояний систем.

Данная монография по структуре содержит пять глав. В первой главе кратко изложены основные понятия природно-антропогенных систем, урбанизированных территорий и городских агломераций, представлены их характеристики и выделены классы объектов соответствующих систем, подлежащие обязательному изучению и контролю. Описаны мировые тенденции в процессах урбанизации, указаны основные проблемы измеримости состояний урбанизированных систем. Приведена существующая методология комплексной оценки и оценки рисков, а также описаны системные модели, используемые в данной области. Показано, что анализ данных наблюдений и измерений состояний и процессов развития урбанизированных территорий позволяет выявить закономерности в динамике урбанизации, обеспечить изучение городов как сложных градостроительных и социально-экономических систем, а также обеспечить их системное представление в виде объектов стратегического планирования. Урбанизированные территории и городские агломерации рассмотрены как объекты наблюдения и статистического учета. В свою очередь, типовой город представлен как сложная пространственно-распределенная система и урбанизированная территория. Приведена его структурно-функциональная схема, построена

матрица зависимостей функций города и его подсистем, даны структуры основных подсистем города в виде различных иерархических, смешанных и сетевых структур, представлена их краткая характеристика. В главе также описаны используемые базы данных показателей муниципальных образований и базы данных наблюдений при мониторинге и оперативном контроле различных показателей, которые ведут ведомственные субъекты городского мониторинга. Рассматривается возможность построения измерительных шкал в многомерном пространстве показателей для оценки состояний объектов изучаемого класса. Завершается глава представлением комплексной оценки как инструмента стратегического планирования, выводами и некоторыми актуальными задачами в данной области.

Во второй главе излагаются методы комплексных исследований состояния природных поверхностных вод городской среды, обобщаются закономерности процессов биомониторинга с применением методов флуориметрии. Изучаются методы биотестирования токсичности проб воды на культурах фитопланктона с применением флуориметрии. Приводится оценка состояния природных поверхностных вод городской среды, в частности описан процесс осуществления биомониторинга поверхностных вод русла реки Кальмиус и процесс биотестирования токсичности проб воды Кальмиуса. Результаты представлены в виде графиков и таблиц. Показано, что полученные данные по биотестированию подтверждают результаты проведенного мониторинга и дают возможность сформировать более полное представление о состоянии биоиндикаторных организмов, помещенных в условия исследуемой водной среды, значительно расширяя возможности определения качества водных ресурсов. Содержательная информация главы связана с иллюстрацией практических методов комплексных измерений применительно к одной из наиболее сложных природных сред урбанизированных территорий.

Третья глава посвящена развитию теоретических и экспериментальных методов комплексных измерений. В частности, затрагиваются методы интегрированной оценки состояний урбанизированных территорий на основе данных мониторинга, представлены возможности использования моделей, построенных на основе эмпирических и статистических данных. В главе также приведены основные понятия и используемые принципы, описан выбор эмпирических мер и моделей пространства состояний, представлена методология интегрированной оценки состояний объектов и процедура построения измерительных шкал. Приводятся математические зависимости и критерии для анализа состояний и процессов развития урбанизированных территорий, методика комплексных измерений и анализа состояний систем, разработанные алгоритмы оценки параметров урбанизированных территорий и т.п. Здесь даны практические примеры интегрированной оценки состояний объектов и методы построения измерительных шкал применительно к нескольким видам различных систем.

Последующие главы монографии посвящены разработке аппаратно-программных комплексов мониторинга состояния водных объектов. В четвертой главе приведены внедренные варианты информационно-измерительных систем для мониторинга и оценки состояния природных поверхностных вод с использованием методов биомониторинга и средств оперативного автоматизированного контроля. В частности, описан разработанный программно-аппаратный комплекс мониторинга состояния водных объектов, представлена флуориметрическая система, основанная на принципах метода Pulse amplitude modulation и метода Fast repetition rate. Приводятся разработанные авторами одно- и двухкомпонентные электромагнитные измерители скорости течения жидкости, а также автономная станция сбора и передачи информации. Описан алгоритм функционирования модуля сбора информации.

Пятая глава монографии посвящена программно-аппаратному комплексу мониторинга состояния техногенных пространственно-распределенных водных объектов. В главе представлена архитектура интеллектуальной системы мониторинга режимов работы водораспределительной сети, описан автономный комплекс контроля технологических параметров, приведены модели режимов работы, полученные на основе методов машинного обучения, в частности, модели режимов работы водораспределительных сетей с помощью гребневой и лассо-регрессий и моделей режимов работы водораспределительных сетей на основе ансамблей классификаторов и нейросетевого подхода. Характеризуются особенности построения моделей, итоговые данные представлены в виде графиков и таблиц.

Перечень основных инфраструктурных, экологических, социально-экономических, промышленных, климатических и других показателей и индикаторов, используемых при комплексной оценке урбанизированных территорий и городских агломераций, скомпонован в виде таблицы и приведен в приложении к монографии. В приложении также представлен Макрос и пользовательские функции на VBA, реализующие алгоритм выбора эталонного процесса при описании процессов развития объектов.

Преимущество данной монографии состоит в том, что предложенные подходы к обработке и анализу эмпирических и статистических данных, алгоритмы оценки урбанизированных территорий по совокупности параметров, а также разработанные системы комплексных измерений могут быть использованы при описании и прогнозировании поведения различных сложных систем. При комплексных измерениях возможно одновременное изучение различных показателей систем, качественно отличающихся друг от друга.

Именно с целью показать универсальность предложенных методов, в монографии представлены практические примеры по интегрированной оценке урбанизированных территорий и построению измерительных шкал, а также установлению математических зависимостей и критериев для анализа состояний и процессов развития урбанизированных территорий. Так, например, выполнена комплексная оценка урбанизированных территорий (города России), дан пример анализа социально-экономического развития субъектов Российской Федерации, изложена оценка состояния жилищно-коммунального хозяйства городов России, изучены процессы землепользования в странах мира и т.д. Особое внимание уделено способу объединения разнородных параметров, отражающих экологические, экономические и социальные характеристики территории, в интегральные критерии, основанные на общем подходе к оценке и анализу городской среды.

Авторы выражают искреннюю благодарность доктору технических наук, заведующему кафедрой компьютерных технологий Донецкого государственного университета (ДонГУ) профессору Аверину Г.В. за помощь в подготовке третьей главы монографии, а также за консультации, обсуждения и дискуссии, позволившие глубже вникнуть в проблему комплексной оценки сложных систем как междисциплинарного направления науки.

Отдельные слова благодарности рецензентам – профессорам А.З. Глухову, А.Г. Милославскому и А.И. Сердюку, взявшим на себя нелегкий труд по рецензированию рукописи монографии. Также авторы высказывают свою признательность сотрудникам кафедр биофизики и компьютерных технологий ДонГУ, оказавшим разностороннюю помощь при подготовке данной монографии. Особая благодарность выпускнику физико-технического факультета ДонГУ магистру В.В. Щербинину за идею, дизайн и оформление обложки данной монографии.

Монография будет интересна специалистам, занимающимся разработками информационных и управляющих систем, исследованиями в области системного анализа, мониторинга и оценки состояния окружающей среды и урбанизированных территорий. Данный труд может способствовать совершенствованию процессов комплексных измерений для достижения целей устойчивого и сбалансированного развития.

В 2025 году исполняется 150 лет с даты подписания в 1875 году странами мира Метрической конвенции, текущий девиз Всемирного дня метрологии 2025 – *«Измерения на все времена, для всех народов»*. Поэтому название монографии, которое начинается со слов *«Комплексные измерения»* как нельзя лучше, на наш взгляд, отражает данный девиз и основной методологический замысел авторов данного исследования.

«Точная наука немыслима без меры» – отмечал Дмитрий Иванович Менделеев. Авторы монографии считают, что сегодня основная проблема анализа процессов развития природно-технических, социально-экономических и экологических систем связана именно с ответом на основополагающий вопрос: Что должно выступать комплексной мерой при оценке состояния таких систем? Решение этой задачи позволит преобразовать комплексную оценку в точную и объективную науку. Авторы надеются, что им удалось внести посильный вклад в решение данной проблемы, что найдутся сторонники предложенного ими подхода и монография будет с интересом принята широким кругом специалистов.

## Глава первая

### **ПРОБЛЕМЫ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ И АНАЛИЗА СОСТОЯНИЙ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ И ГОРОДСКИХ АГЛОМЕРАЦИЙ**

Комплексная оценка урбанизированных территорий относится к области системных наук, которая интенсивно развивается как междисциплинарное направление исследований. Данная наука обладает общепринятой методологией, большим фактографическим материалом данных, которые получены при мониторинге различных подсистем и аспектов развития городских территорий, множеством практических задач, требующих решения. Однако большинство методов комплексной оценки – экспертные, применяемые модели систем не являются универсальными с точки зрения использования массивов данных мониторинга, представленных по общей форме и структуре. В этом плане методология комплексной оценки не основывается на объективном подходе и слабо использует естественнонаучные методы при описании различных аспектов развития урбанизированных территорий и разноплановых источников получения информации.

Проблема современных систем мониторинга связана с накоплением громадных объемов информации, которая трудно поддается анализу и выявлению закономерностей развития объектов с целью построения их моделей. Данные измерений являются основой для математического моделирования, однако в настоящее время модели первичны, а данные служат в большей степени для проверки адекватности и точности моделей. Основная идея исследования, изложенная в монографии, связана с разработкой и использованием универсальных моделей описания данных, которые могут выступать как в качестве моделей описания данных

наблюдений, так и в качестве типовых моделей состояния и процессов развития объектов и систем.

В настоящее время при изучении состояний систем мониторинг отдельных параметров и показателей достаточно проработан. Однако стоит проблема оптимального использования получаемых данных статистических наблюдений и оперативного контроля для решения задач комплексной оценки. Данную проблему мы связываем с понятием комплексных измерений состояний систем и анализом процессов их развития. В этом плане урбанизированные территории, которые характеризуются множеством инфраструктурных, демографических, социально-экономических, технологических и экологических параметров, являются наглядным объектом исследований для реализации системы комплексных измерений.

### **1.1 Урбанизированные территории и их характеристика**

Урбанизация – закономерный процесс развития человеческой цивилизации. Урбанизация (от лат. *Urbanu* – городской, *urbs* – город) – это исторический процесс повышения роли городов, городского образа жизни и городской культуры в развитии общества, связанный с концентрацией человеческой деятельности в сравнительно немногочисленных центрах и ареалах социально-экономического и технологического развития территорий.

В урбанистике состояние городов и агломераций характеризуют градостроительными и демографическими показателями, социально-экономическими параметрами развития территорий, данными о транспортной, жилищно-коммунальной инфраструктуре, промышленной и жилой застройки.

В экологической безопасности чаще всего, говоря о состоянии урбанизированных территорий и городских агломераций, подразумевают загрязнение природных сред, наблюдаемый уровень антропогенного воздействия на природу и человека, а также антропогенные характеристики и видовое биоразнообразие, свойственное таким системам.

Различные виды урбанизированных территорий и городских агломераций включают в себя множество однотипных объектов, которые можно считать объектами одного класса. Основными объектами урбанизированных территорий 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 являются 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 урбанизированной территорией понимается участок суши, занятый поселением городского типа и связанными с ним производственными, транспортными и инженерными сооружениями с определенной численностью населения. Также под урбанизированной территорией могут пониматься города, агломерации и урбанизированные регионы. На таких территориях существенное значение имеют не только искусственные антропогенные и техногенные процессы, но и естественные природные.

В основу урбанистики положено понятие населенного пункта. *Населенный пункт* – это пространственно-планировочное образование постоянного проживания населения, имеющее необходимые для обеспечения жизнедеятельности граждан жилые и иные здания и

сооружения, собственное наименование и установленные в соответствующем порядке территориальные границы. Обычно население таких объектов менее тысячи жителей. Населенные пункты подразделяются на городские населенные пункты (жители которых преимущественно не связаны с сельскохозяйственным производством и (или) переработкой сельскохозяйственной продукции) и сельские населенные пункты (жители которых заняты преимущественно сельскохозяйственным производством и (или) переработкой сельскохозяйственной продукции). Относительно крупный населенный пункт считается городом [1, с. 13].

*Город* – это населённый пункт, имеющий соответствующий статус с учётом численности населения, характера занятий большинства его жителей, географического, экономического, исторического и культурного значения. В настоящее время не существует общепринятого определения «город», этот термин имеет различные значения в разных странах.

Слово «*город*» и связанная с ним *цивилизация* происходят от латинского корня *civitas*, изначально означавшего «гражданство» или «член сообщества», и в конечном итоге ставшего соответствовать *urbs*, означающему «город» в более физическом смысле. Римское *civitas* тесно связано с греческим *polis* – еще одним общим корнем, появляющимся в таких английских словах, как *metropolis*.

Для облегчения международных сравнений коалиция из шести международных организаций (Европейской комиссией, ОЭСР, Всемирным банком и т.д.) разработала новое глобальное определение городов<sup>1</sup>,

---

<sup>1</sup> Во многих странах для определения городской территории используется минимальная численность населения, но эта численность может составлять 200 (как в Дании), 2 000 (Аргентина), 5 000 (Индия) или 50 000 (Япония) или даже 100 000 жителей (Китай). Некоторые страны не используют статистическое определение, а определяют городские территории административным решением. В других странах для определения того, следует ли классифицировать поселения как городские/сельские, используется секторальная занятость или предоставление инфраструктуры и услуг

поселков и районов с небольшой плотностью населения, а также сельских районов. В свою очередь, Статистическая комиссия ООН в марте 2021 года одобрила показатель степени урбанизации в качестве рекомендуемого метода для международных сопоставлений.

*Степень урбанизации* – современный показатель, помогающий определить, что входит в понятие «город».

Степень урбанизации определяет три типа поселений:

- города с населением не менее 50 000 жителей с плотностью более 1 500 жителей на кв. км;
- города и районы с полуплотной застройкой, в которых проживает не менее 5 000 с плотностью не менее 300 жителей на кв. км;
- сельские районы, которые в основном имеют низкую плотность населения (менее 300 жителей на кв. км).

Существует также следующая международная классификация городов:

- города-многомиллионники (*Multimillioncity population*) – многомиллионные города с населением 2 500 000 и более жителей;
- города-миллионники – города с населением от 1 млн. чел.;
- крупные города (*Big-city population*) – города с населением 500 000 и более жителей;
- большие города – города с населением от 100 тыс. чел.;
- средние – города с 50–100 тыс. жителей;
- малые – города с менее 50 тыс. жителей.

Территориальное распространение городов разных размеров по всему национальному пространству составляет *городскую систему страны*. Согласно российскому законодательству городские и сельские населенные пункты в зависимости от общей численности постоянного населения подразделяются на группы в соответствии с таблицей 1.1.

Таблица 1.1 – Классификация городов в Российской Федерации

Группы	Население, тыс. чел.		
	Агломерации	Городские населенные пункты	Сельские поселения и населенные пункты
Крупнейшие*	свыше 1200	более 1 000	–
Крупные	от 500 до 1200	от 250 до 1 000	свыше 5
Большие	от 300 до 500	» от более 100» до 250	от более 1 до 5
Средние	от 100 до 300	» более » 50 до 100	от 0,2 до 1
Малые**	до 100	до 50	от менее 0,2 до 0,05
* Градостроительная деятельность в субъектах Российской Федерации – городах федерального значения Москве, Санкт-Петербурге и Севастополе регулируется [2, глава 9, статья 63]			
** В группу малых городов включаются поселки городского типа			

Источник: [2–4]

Закономерный процесс урбанизации – это формирование городских агломераций. *Агломерация* представляет собой компактную территориальную группировку населённых пунктов, главным образом городских, объединённых в сложную многокомпонентную динамическую систему с интенсивными производственными, транспортными и культурными связями, общей социальной и технической инфраструктурой. Как правило, в России агломерацией считается урбанизированная территория с населением от 100 и более тыс. чел. и внешней (пригородной) зоной с численностью городского поселения от 10 и более тыс. чел.[5, с. 41].

Образование городских агломераций – одна из естественных стадий урбанизации. Сущность развития городских агломераций отражает процесс роста и концентрации производительных сил, усиления контрастности расселения, сосредоточия многих видов деятельности в наиболее эффективных для их развития ареалах. Агломерации, формирующиеся вокруг одного города, относят к моноцентрическим, а развивающиеся на основе нескольких городов-ядер – к полицентрическим. Ядро агломерации, образованной от города – это крупный город, по периферии которого проходит несколько основополагающих

транспортных магистралей. К городу-центру (ядру) или к нескольким городам-ядрам плотно примыкают населённые пункты, находящиеся в зоне влияния (это пригородная зона). В XX веке агломерации становятся доминирующей формой расселения, концентрирующей основной демографический и экономический потенциал планеты.

Основные признаки городской агломерации:

- наличие крупного города – города-ядра или городов-ядер, вокруг которых формируется и развивается городская агломерация (центр агломерации с населением как правило 100 и более тыс. чел.);
- охват пригородной территории, с которыми агломерация способна установить интенсивные хозяйственные и транспортные связи – связи между городом-ядром и населёнными пунктами агломерации (с населением от 10 и более тыс. чел., проживающего в зоне 1,5–2,0 часовой транспортной доступности города-центра);
- дополнение друг друга и определенное разделение функций между населёнными пунктами для выполнения общих целей агломерации, направленных на ее дальнейшее развитие.

Развитие агломераций приводит к созданию крупных урбанизированных регионов. При этом естественный ход эволюционных процессов укрупнения городских агломераций формирует их в форме мегаполисов. В первую очередь связано это с тем, что в сверхкрупных городских системах эффективнее развивать производственную сферу и бизнес, создавать более качественные условия для получения знаний, формировать единое информационное пространство, общую хозяйственную, культурную и социальную среду.

*Мегаполис (мегагород)* – очень большой город, как правило, с населением более 10 миллионов человек, часто он представляет собой агломерацию или метрополис, разросшийся в сплошную городскую зону. Термин «мегаполис» вошел в обиход в конце 19-го или начале 20-го века для обозначения феномена очень крупных городских агломераций.

Мегаполисы включают пригороды и загородные районы, а иногда и окраинные города, характеризующиеся определенной степенью экономической и политической независимости. В 2018 году в 20 странах было 33 мегаполиса с населением около 529 миллионов человек, что составило 13% городских жителей мира.

К 2023 году количество мегаполисов в мире увеличилось до 44, при этом процесс их развития приводит к формированию *метагородов* – крупнейших мегаполисов с населением более 20 миллионов человек. Подобная форма урбанизации называется *конурбацией* – это процесс формирования урбанизированного региона, включающего ряд мегаполисов, городов, крупных поселков и других городских территорий, которые в результате роста населения, физического расширения и транспортной связности объединились в одну непрерывную городскую или промышленно развитую территорию.

На любой урбанизированной территории, в любом регионе или в городской агломерации в связи с происходящей хозяйственной деятельностью человека возникает природно-антропогенная система как сложное геообразование. Данная система приходит на смену природным геосистемам, существовавшим там до появления в природной среде людей, инженерных сооружений и техники.

Обычно под *природно-антропогенной системой* 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 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.

Анализ работ многих авторов указывает на то, что урбанизированные и природно-антропогенные системы можно рассматривать как 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 урбанизированным и природно-антропогенным 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 также понимают экологическую систему, образованную поселением с соответствующей инфраструктурой. Среда обитания таких систем преобразована или искусственно создана человеком.

При комплексной оценке урбанизированных территорий, городских агломераций и природно-антропогенных 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 и урбанизированных систем дана в таблице 1.2.

В любой момент времени урбанизированные территории и городские агломерации находятся 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 урбанизированных территорий. Для характеристики самых разных аспектов систем в мировой практике разработаны комплексы показателей и индикаторов, которые приняты к использованию научным сообществом [6–15]. Основные компоненты развития урбанизированных территорий и городских агломераций, анализируемые при комплексной оценке, приведены в таблице 1.3, некоторые показатели даны 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.

Таблица 1.2 – Классификация природно-антропогенных и урбанизированных систем

Природно-антропогенные и урбанизированные 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 <sup>2</sup> , 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

<sup>2</sup> 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 1.3 – Компоненты характеристики урбанизированных территорий и городских агломераций

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

Перечни индикаторов приводятся в специальной литературе [6, 7, 11, 16, 17]. Данные показатели носят общий характер и собираются на основе официальной статистической информации, а также данных различных субъектов градостроительного, социально-экономического, гигиенического и экологического мониторинга, а также субъектов мониторинга земель, городской среды, недвижимости и т.д. Основные показатели для комплексной оценки по компонентам развития урбанизированных территорий приведены в источниках [9, 18–29]. Кроме того, в России показатели для комплексной оценки определены следующими документами [30–34] и т.д.

Помимо 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 или аспекту 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 и урбанизированных территорий [6, 7, 11, 17, 19, 20, 35–39].

Существуют индикаторы для оценки загрязнения природных сред [16, 21, 24, 34, 40–46], анализа развития городов [10, 12, 47–53] и стран мира [16, 20], оценки биоразнообразия и качества экологических систем [19, 43, 54, 55], а также состояния технологических и техногенных систем [56, 57]. 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 [20], а также в 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 урбанизированных территорий и городских агломераций обычно представляет собой очень трудоемкую процедуру из-за наличия большого количества показателей, отражающих самые разные аспекты развития систем и требующих анализа [28, 58]. В таких исследованиях обычно применяются три подхода. Первый подход

связан с разработкой обширных докладов о состоянии и предполагаемом развитии систем или территорий [10, 16, 17, 19, 20, 51]. 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 [10, 12, 20, 21, 26, 30, 31, 41, 43, 45, 54, 59]. Третье теоретическое направление комплексной оценки тесно увязано с системным анализом проблем развития, методологией оценки рисков [24, 27, 28, 35, 37, 40, 42, 44, 47, 49, 54–57, 60–68] и теорией системной динамики [50, 58, 69].

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 урбанизированных территорий и городских агломераций [16, 19, 20]. Анализ проводится преимущественно для стран, регионов, городов, отдельных территорий и однотипных объектов.

Как отмечается в работе [58], применение комплексной оценки позволяет существенно расширить пространство для выводов экспертов, однако этот путь часто приводит к обширным докладом 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 государственных структур, аналитических организаций, фондов, международных программ, институтов и университетов.

Комплексная оценка урбанизированных территорий и городских агломераций 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 и инфраструктурного 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 системных науках, биологии, экологии и общественных дисциплинах подобных систем количественной оценки почти не существует. В экологических и социальных науках, которые изучают состояния урбанизированных территорий и городских агломераций, 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 состояния урбанизированных территорий и городских агломераций используются различные индексы, например: человеческого развития, глобальной конкурентоспособности, экономической свободы, экологической эффективности, качества и безопасности жизни, нестабильности стран, восприятия коррупции, демократии, свободы прессы, общества, основанного на знаниях, 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. Считается, что 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 [22]. Сегодня научные работы в данном направлении ведутся в области исследования индикаторов и индексов в рамках общей теории систем Берталанфи [6, 7, 11, 17]. В результате совместных усилий ученых многих стран мира при активном участии 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 [22].

Обычно методики расчета интегральных индексов основываются исключительно на экспертных методах. Обзоры методов построения интегральных индексов приведены в работах [21, 22].

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 [10, 12, 20]. 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:

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

где  $p_i$  – значения  $i$ -го 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.

Например, 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) [20].

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

$$I = \sum_{i=1}^3 \alpha_i \cdot I_i, \quad \alpha_i = 1/3. \quad (1.2)$$

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

Индикатор продолжительности жизни определяется в виде:

$$I_1 = \frac{p - p_{\min}}{p_{\max} - p_{\min}}, \quad (1.3)$$

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

Индикатор образования имеет вид:

$$I_2 = \frac{2}{3}p_1 + \frac{1}{3}p_2, \quad (1.4)$$

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:

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

где  $p_{\max} = 40000$  дол. США по паритету покупательной способности<sup>3</sup>, а  $p_{\min} = 100$  дол. США по паритету покупательной способности.

Методика ИРЧП широко применяется при оценке человеческого потенциала разных стран [20]. После 2010 года методика расчета была изменена, в результате формула (1.2) заменена на формулу геометрического среднего  $I = \sqrt[3]{I_1 I_2 I_3}$ .

---

<sup>3</sup> 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

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:

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

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 являются типичными экспертными оценками, которые приняты исходя из 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 [10].

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 [32]. 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:

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

где  $I_i$  – индикаторы в виде нормируемых значений показателей;  $\alpha_i$  – 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 урбанизированных территорий и городских агломераций.

В свою очередь, нормативный документ «Критерии оценки экологической обстановки территорий для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия» [33] 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 [34]:

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

где  $n$  – число загрязняющих атмосферу веществ, учитываемых при определении индекса (обычно 5),  $C_i$  – среднегодовая концентрация  $i$ -ой примеси в воздухе;  $\beta_i$  – 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 ( $КИЗА \leq 5$ ), класс риска ( $5 < КИЗА \leq 8$ ), класс кризиса ( $8 < КИЗА \leq 15$ ) 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  $P$  [21]. 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 [21, 34].

В Украине оценка загрязнения атмосферного воздуха проводится также с учетом кратности превышения показателя загрязнения  $ПЗ$  относительно нормативного значения предельно допустимого загрязнения  $ПДЗ$ . 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.

Показатель загрязнения рассчитывается по формуле:

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

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  $АТМО$ ,  $ВЕЛАТМО$ ,  $API$ ,  $Z$ ,  $Q$ ,  $HI$ ,  $H$  и т.д. [21, 24, 26–28, 31–36].

При оценке загрязнении поверхностных вод часто используется индекс загрязнения воды:

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

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; 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 Бриллюэна, Бергера-Паркера. Величины индексов разнообразия часто коррелируют друг с другом.

Индекс Симпсона определяют по формуле:

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

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:

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

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 [43, 54]. 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 урбанизированных территорий, городских мегаполисов и природно-антропогенных систем выполнен в известных работах [13, 16–19, 23,

28, 42, 47, 49, 50, 51, 58, 62, 70–77]. 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 урбанизированных территорий и городских агломераций очень мало. Сегодня научное направление комплексной оценки систем формируется в большей степени как описательная наука. По утверждению авторов статьи [43] 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. Данный вывод справедлив для многих научных направлений урбанистики, регионалистики и глобалистики.

Таким образом, на данном этапе развития научных исследований следует признать, что в области комплексного анализа урбанизированных территорий и городских агломераций 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 урбанизированных территорий 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 [18, 22, 23, 27, 28, 43, 44, 48, 66, 67], энергоэнтропийной концепцией безопасности [58], методами математического моделирования опасностей и угроз [24], методологией анализа риска [24, 27, 35, 37, 40, 56, 60, 61], методами системной динамики применительно к социальным и экологическим процессам [47, 58], методологией оценки устойчивости сложных систем, основанной на теории неравновесной термодинамики 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 [22–24, 28, 40, 42, 44, 45, 47, 48, 49, 57, 58, 66, 67, 78]. 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, системодинамической и событийной оценкой процессов развития 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. 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, Среда R 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 описания 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. 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, 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 с помощью средств ИИ анализировать тренды и вести оценку отношений и связей на информационном поле.

Стали появляться научные работы, которые посвящены использованию больших языковых моделей при описании процессов развития объектов в экологических, технических и социальных науках.

Недостатками системного анализа урбанизированных территорий и городских агломераций 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 и урбанизированных территорий это часто невыполнимо.

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

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

где  $p = (p_1, p_2, \dots, p_n)$  –  $n$ -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). В этой области развиваются детерминированные и стохастические методы моделирования процессов и ситуаций, методы междисциплинарного моделирования сложных систем, 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 [58].

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 состояния урбанизированных территорий и городских агломераций, отличающихся сложными причинно-следственными связями и спецификой физико-химических и социально-экономических процессов. Как следствие подобные модели имеют низкую адекватность и слабо идентифицируются по данным наблюдений.

Наиболее широкое распространение при комплексной оценке и анализе безопасности природно-антропогенных систем, урбанизированных территорий и городских агломераций получила методология анализа риска [24, 27, 33, 35, 37, 56, 60, 61]. Данное направление отличается наличием определенных теоретических обоснований, достаточно развитой феноменологической<sup>4</sup> базой и тесной связью с опытом и статистическими данными наблюдений. Методология анализа рисков применительно к природно-антропогенным и биологическим системам бурно развивается [24, 27, 33, 35, 37, 56, 61]. 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

---

<sup>4</sup> 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

областях приведен в известной литературе [24, 35, 56, 61]. 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 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 [24, 35, 56, 61].

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 со всесторонним анализом систем по вероятностным характеристикам характерных событий.

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 [50]. 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 [50]. 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 [47, 58].

Последние теоретические разработки в области системной динамики [58] 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 значений нескольких показателей, характеризующих различные урбанизированные территории и городские агломерации. 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 урбанизированных территорий и городских агломераций, да и в целом 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.

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 урбанизированных территорий, городских агломераций и любых других природно-антропогенных систем. Для этого есть несколько причин:

- имеются обширные массивы опытных данных в виде временных рядов показателей состояния и развития урбанизированных территорий и городских агломераций 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 урбанизированных территорий;
- 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 [28, 42, 47, 49, 58, 64].

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

## **1.4 Урбанизированные территории и городские агломерации как объекты наблюдения и статистического учета**

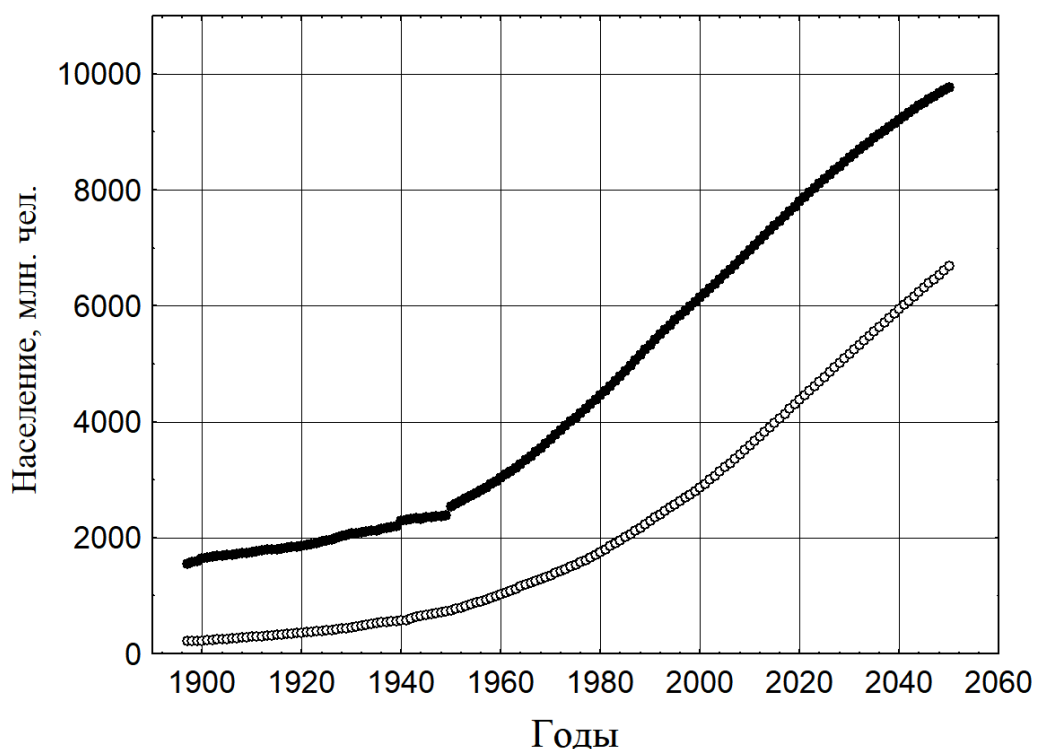
### **1.4.1 Мировые процессы урбанизации**

Урбанизация определяется политическими, демографическими, социально-экономическими и другими процессами развития цивилизации.

В мире к 1800 году доля городского населения была значительно ниже 10%. Во второй половине XX века в процессе урбанизации наступил резкий перелом, получивший название *«городская революция»*. Одним из первых соответствующее понятие ввёл английский археолог, историк Гордон Чайлд в 1950 году.

По оценкам ООН за первые 20 лет «городской революции» (1950 – 1970 гг.) прирост численности горожан в мире составил 83,4% от общего числа населения, проживавшего в городских районах мира на протяжении всей предыдущей истории человечества. За следующие 20 лет (1970–1990) численность городского населения увеличилась ещё на 68,7%. В целом же за период с 1950 по 1990 годы численность городского населения мира выросла почти в 3,1 раза и в первой четверти XXI века сохраняет тенденцию к дальнейшему значительному увеличению (рис. 1.1). Таким образом, в XX веке рост населения чрезвычайно ускорился, достигнув во второй половине столетия невиданных в истории человечества величин (табл. 1.4). При этом в конце 1960-х годов наблюдались самые высокие темпы прироста населения (2% в год) [79, 80]. В течение XX столетия население Земли увеличилось с 1,65 миллиарда до 6 миллиардов человек.

В XXI веке тенденция увеличения городского населения сохраняется. В 2007 году впервые за всю историю человечества численность городского населения превзошла численность сельского. В 2024 году 57,9% населения Земли проживало в городах, согласно прогнозов к 2050 году доля городского населения составит 68,7% [81].



Источник: авторская подборка, основанная на данных [81–85]

Рисунок 1.1 – Динамика численности населения мира в XX–XXI веке:

● – все население, ○ – городское население

Таблица 1.4 – Численность и прирост мирового населения

Годы	Население, млрд. чел.	Время прироста в 1 млрд. чел., лет	Доля городского населения Земли, %	Население регионов, %			
				Европа	Азия	Африка	Америка
1800	1	Вся предшествующая история	3,0	20	65,6	10,8	3,2
1927	2	127	21,3	19,7	58,8	8,8	12,3
1960	3	33	33,9	19,8	57,0	9,1	13,7
1974	4	14	39,1	15,1	59,9	10,2	14,4
1987	5	13	42,2	13,5	60,5	11,7	13,9
1999	6	12	47,3	11,2	62,0	13,0	13,5
2011	7	12	52,0	9,3	62,2	15,7	12,4
2022	8	11	57,4	9,0	61,9	16,7	12,0
2040	9	18	65,5	6,7	56,9	23,8	11,8

Составлено авторами по материалам: [84–87]

В 1830 году в мире был только один город с населением более миллиона жителей (Лондон), в 1914 году таких городов стало 12, крупнейшим из которых был тот же Лондон с более чем 7 миллионами жителей [88].

Количество<sup>5</sup> крупных городов (более 100 000 жителей), которое удвоилось между 1700 и 1800 годами, увеличилось в 12 раз между 1800 и 1914 годами. Что касается очень крупных городов (более 500 000 чел.), то их количество увеличились в 200 раз в течение XIX века. После Первой мировой войны в странах мира возникло очень мало новых городов, за исключением территории СССР.

Высокие темпы роста городского населения мира во второй половине XX века связаны с миграцией сельского населения в города и с «демографическим взрывом» в развивающихся странах.

Рост численности сельского населения во второй половине XX века происходит за счёт развивающихся стран (известно, что в них проживает около 90% сельских жителей мира). В 1990 году в развивающихся странах проживало 61,4% всех горожан мира (в 1950-м только 38,7%), а к 2025 году, по оценкам демографов ООН, эта цифра возрастет почти до 80%. В группе развитых стран доля сельского населения постепенно сокращается.

Учитывая значительные различия в темпах роста городов в разных географических регионах в период с 1950 по 2018 год, произошло значительное перераспределение городского населения в мире. Доля Африки увеличилась почти втрое – с 4% в 1950 году до 13% в 2018 году, доля Азии выросла более чем на 60% – с 33% до 54%, а доля Латинской Америки и Карибского бассейна – с 9 до 13%. Тем временем доля Европы и Северной Америки сократилась, причем доля Европы сократилась почти на две трети, с 38% до 13%, а Северной Америки – более чем наполовину, с 15% до 7% [89, с. 24].

---

<sup>5</sup> с. 288: Paul Bairoch and Gary Goertz. Factors of Urbanisation in the Nineteenth Century Developed Countries: A Descriptive and Econometric Analysis. [First received January 1985; in final form October 1985]

К 2030 году прогнозируется следующее размещение городского населения мира (численность) в разбивке по географическим регионам: на первом месте Азия – 54,2% городского населения мира, затем Африка – 16%, Латинская Америка и Карибский бассейн – 11,6%, Европа – 11,1%, Северная Америка – 6,5% и Океания – 0,6% [89, с. 25].

По прогнозам ООН в 2050 году в Африке будет проживать 22% городского населения мира, в Азии – 52% (3,5 миллиарда человек). В совокупности на Африку и Азию будет приходиться почти три четверти городского населения мира. Ожидается, что доля всех остальных географических регионов в мировом городском населении сократится, несмотря на то, что, по прогнозам, их городское население существенно возрастет [89, с. 25].

В свою очередь, общая численность населения мира в разбивке по географическим регионам в 2030 году ожидается [89, с. 25] следующей: на первом месте Азия – 57,8% населения мира, затем Африка – 20%, Европа – 8,6%, Латинская Америка и Карибский бассейн – 8,4%, Северная Америка – 4,6% и Океания – 0,6%.

Исходя из национальных критериев определения понятия «город», доля городского населения сегодня составляет [81]: в Австралии – 87%, в Южной и Северной Америке – 86 и 84% соответственно, в Европе – 76%, в Океании – 69%, в Азии – 54%, в Африке – 46% (табл. 1.5).

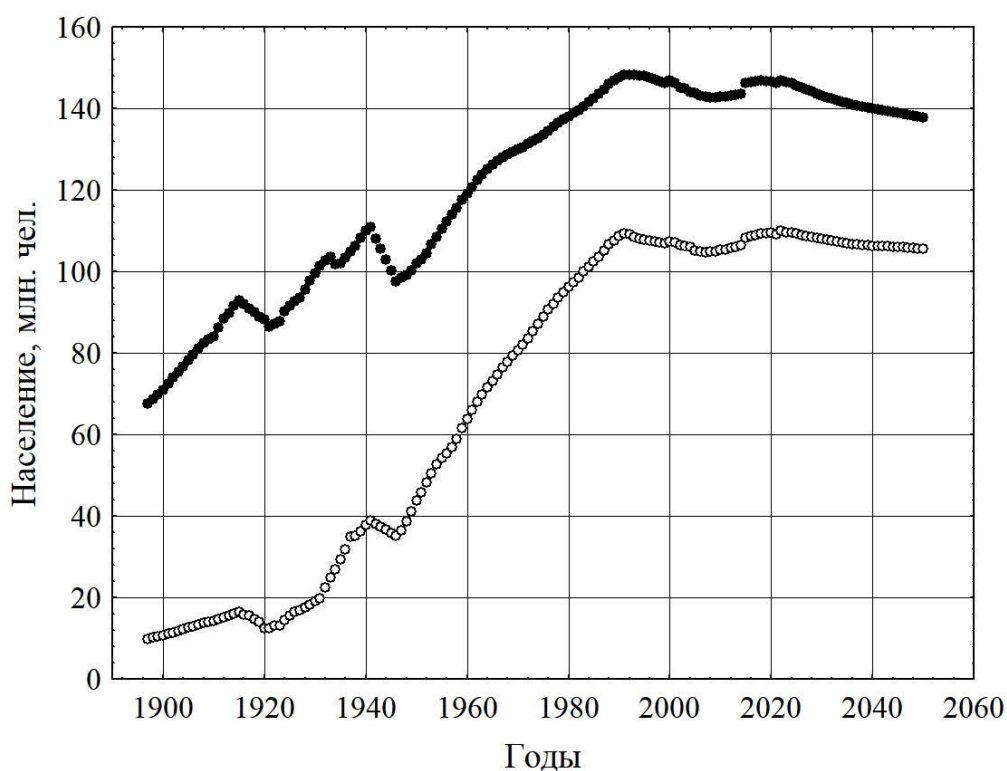
Что касается России, то общая численность ее населения за последние 125 лет увеличилась в два раза, в то же время численность городского населения возросла более чем в десять раз (рис. 1.2). С 1897 года по настоящее время численность населения России увеличилась примерно с 66 миллионов человек до 146 млн. (на 121%). В то же время демографический потенциал вырос всего на 40%. Это означает, что только около 33% прироста населения произошло за счет внутреннего роста (плюс миграция), 48% – за счет изменений возрастной структуры (вызванных увеличением продолжительности жизни и более молодой возрастной структурой первоначального населения) и 19% – за счет взаимодействия обоих факторов [90].

Таблица 1.5 – Динамика доли городского населения мира в разбивке по географическим регионам, %\*

Регионы \ Годы	1950	1970	1990	2000	2010	2020	2025**	2050**
Африка	14,3	22,6	31,5	35,0	38,9	43,5	45,9	58,9
Северная Америка	63,9	73,8	75,4	79,1	80,8	82,6	83,6	89,0
Южная Америка	42,7	60,0	74,2	79,6	82,4	84,6	85,6	90,1
Европа	51,7	63,1	69,9	71,1	72,9	74,9	76,1	83,7
Азия	17,5	23,7	32,3	37,5	44,8	51,1	54,0	66,2
Австралия	77,0	84,0	85,4	84,2	85,2	86,2	86,9	91,0
Океания	62,5	70,2	70,3	68,3	68,1	68,2	68,5	72,1

\* – United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World Urbanization Prospects: The 2018 Revision. New York, 2018. <https://population.un.org/wup/downloads> (28.01.25);

\*\* – прогноз



Источник: авторская подборка, основанная на данных [81, 90–109]

Рисунок 1.2 – Динамика численности населения России в XX–XXI веке:

● – все население, ○ – городское население

Явно выражена также неравномерность размещения городского населения по отдельным странам. Сегодня выделяются девять стран мира с

городским населением свыше 100 млн человек каждая: Китай, Индия, США, Бразилия, Индонезия, Нигерия, Япония, Мексика, Россия, (табл. 1.6).

Крупнейшие страны мира по численности населения – Китай и Индия – при высоких темпах роста городского населения характеризуются невысокой его долей в общей численности населения (66 и 37% соответственно).

В качестве примера контрастности доли городского населения можно привести следующие страны: Бурунди – 14% городского населения, Эфиопия – 22%, Гвинея – 37%, Замбия – 44%, Конго – 68%, Германия – 78%, Испания – 81%, Великобритания – 84%, Австралия – 86%, Дания, Чили – по 88%, Нидерланды, Аргентина, Япония – по 92%, Израиль – 93%, Исландия – 94%, Уругвай – 96%, Бельгия – 98%, Сингапур, Монако, Кувейт – по 100%. В США – 83%, а в России – 75% населения сосредоточено в городах. Средний показатель доли городского населения в наименее развитых странах – 35%, в странах с высоким уровнем дохода – 82%, в странах с уровнем дохода выше среднего – 68%, в странах со средним и низким уровнем дохода – 54 и 33% соответственно, во всём мире эта цифра составляет 57% [81].

Особенностью современного этапа социально-экономического развития городов и агломераций является рост открытости их экономики и усиливающиеся процессы глобализации на фоне крайне неравномерного развития регионов мира. Все это ведет к новым возможностям и угрозам в развитии. Городские образования подвержены конкуренции со стороны городов-соседей, к переменам в законодательстве, к существенной миграции населения и значительным изменениям в работе предприятий и сферы услуг, а также к вызовам, которые связаны с быстро формирующейся новой социально-экономической, градостроительной и технологической средой.

Таблица 1.6 – Динамика городского населения мира. Крупнейшие страны по его численности<sup>6</sup>

Годы Страны	Городское население, млн чел.							Доля городского населения, %						
	1950	1970	1990	2000	2020	2025*	2050*	1950	1970	1990	2000	2020	2025*	2050*
Весь мир	750,9	1 354,2	2 290,2	2 868,3	4 379	4 774,6	6 679,8	29,6	36,6	43,0	46,7	56,2	58,3	68,4
Китай	65,4	143,5	310,0	460,4	875,1	956,6	1 091,9	11,8	17,4	26,4	35,9	61,4	66,5	80,0
Индия	64,1	109,4	222,3	291,4	483,1	542,7	876,6	17,0	19,8	25,5	27,7	34,9	37,4	52,8
США	101,9	154,3	190,2	222,9	274,0	287,4	347,3	64,2	73,6	75,3	79,1	82,7	83,7	89,2
Бразилия	19,5	53,3	110,4	142,3	186,2	194,5	215,1	36,2	55,9	73,9	81,2	87,1	88,2	92,4
Россия	45,3	81,3	108,3	107,4	107,5	108,1	110,6	44,1	62,5	73,4	73,4	74,8	75,8	83,3
Япония	44,2	75,4	96,3	100,3	116,1	114,6	103,0	53,4	71,9	77,3	78,6	91,8	92,2	94,7
Германия	47,5	56,8	57,9	61,1	63,9	64,3	66,8	67,9	72,3	73,1	75,0	77,5	78,0	84,3
Мексика	11,9	30,7	61,0	76,0	108,1	115,9	144,9	42,7	59,0	71,4	74,7	80,7	82,1	88,2
Индонезия	8,6	19,6	55,5	88,9	154,2	170,4	234,1	12,4	17,1	30,6	42,0	56,6	59,8	72,8
Великобритания	40,0	42,9	44,7	46,4	56,5	58,8	68,0	79,0	77,1	78,1	78,7	83,9	85,1	90,2
Франция	23,1	36,1	42,2	45,2	53,2	55,0	62,4	55,2	71,1	74,1	75,9	81,0	82,3	88,3
Нигерия	3,5	9,9	28,3	42,6	107,1	130,3	287,1	9,4	17,8	29,7	34,8	52,0	55,8	69,9
Пакистан	6,6	14,4	32,9	45,7	77,4	87,8	160,2	17,5	24,8	30,6	33,0	37,2	38,7	52,2
Турция	5,3	13,3	31,9	40,9	63,8	67,4	82,2	24,8	38,2	59,2	64,7	76,1	78,3	86,0
Иран	4,7	11,8	31,7	42,4	63,4	67,8	80,4	27,5	41,2	56,3	64,0	75,9	78,1	86,0
Италия	25,2	34,4	38,1	38,5	42,0	42,6	44,7	54,1	4,3	6,7	7,2	71,0	72,6	81,1

<sup>6</sup> United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World Urbanization Prospects: The 2018 Revision. New York, 2018.  
<https://population.un.org/wup/downloads> (accessed February 12, 2025)

\* – прогноз

Одной из наиболее характерных особенностей современной урбанизации является значительное усиление концентрации населения в крупнейших городах, агломерациях и прилегающих к ним урбанизированных районах. Эта особенность стала заметной уже в XIX веке, но со всей силой проявилась в XX столетии.

В последние десятилетия наблюдается этап «сверхкрупной городской» урбанизации с формированием очень больших агломераций и наагломерационных систем расселения. В результате в 2000 году в агломерациях-миллионерах проживало свыше 33% всех горожан и более 15% населения мира. Быстро растут агломерации-миллионеры в странах Азии, Латинской Америки и Африки. Безусловными лидерами по числу городов-миллионников являются<sup>7</sup> Китай (101 город), Индия (57) и США (44).

Относительно медленный рост городов наблюдается в развитых странах, что связано с изменившейся в этих странах демографической ситуацией и уже достигнутым очень высоким уровнем урбанизации.

Подавляющее большинство демографов утверждает, что постепенно рост населения стабилизируется по мере того, как стереотипы демографического поведения, получившие распространение в развитых странах, станут характерными и для развивающихся стран.

На сегодняшний день особо выделяются три основных очага мировой урбанизации – США, Западная Европа и Япония. Их дополняют мозаично распространённые по большинству районов мира крупнейшие агломерации, прежде всего с населением свыше 1 млн человек.

Значительная часть городских агломераций с населением свыше 10 млн человек находится в Китае и Индии. Другие четыре страны с более чем одним мегаполисом – это Бразилия, Япония, Пакистан и США. Африканские мегаполисы присутствуют в Нигерии, Египте, Южной Африке, Анголе и Демократической республике Конго; европейские

---

<sup>7</sup> [https://ru.wikipedia.org/wiki/Список\\_стран\\_по\\_количеству\\_городов-миллионеров](https://ru.wikipedia.org/wiki/Список_стран_по_количеству_городов-миллионеров)

мегаполисы размещены в России, Франции и Турции (также в Азии); мегаполисы существуют в Латинской Америке в таких странах, как Бразилия, Мексика, Колумбия, Перу и Аргентина [110].

С 2000-х годов и по настоящее время (2024 г.<sup>8</sup>) крупнейшим мегаполисом мира является Токио с населением 37 миллионов человек, за ним следуют Дели с 33 миллионами, Шанхай с 29 миллионами, Дакка с 22 миллионами, Сан-Паулу, Каир, Мехико и Пекин с 22 миллионами (табл. 1.7). Сегодня в мире насчитывается 36 агломераций с численностью населения свыше 10 млн человек. В Европе таких агломераций 2, в Азии их 23, в Северной и Южной Америке – 3 и 5 соответственно, в Африке – 3 [111].

Агломерации остаются основным видом развитых городских систем, образующих опорный каркас расселения развитых стран. Прежняя концентрация населения в больших городах и агломерациях, в связи с развитием систем транспорта, сменилась тенденциями к деконцентрации в результате более широкого охвата территории урбанизацией. Поэтому в развитых странах, особенно в США, наблюдаются резкое замедление темпов роста населения агломераций и более высокие темпы роста населения внеагломерационных территорий, заметный рост малых городов и сельских поселений. Однако общая тенденция развития городов во всех географических регионах состоит в том, что по мере роста уровня урбанизации скорость урбанизации замедляется. Мир будет еще больше урбанизироваться в течение следующего десятилетия, с 57,5% сегодня до 60,4% к 2030 году. Девяносто шесть процентов роста городов придется на менее развитые регионы Восточной Азии, Южной Азии и Африки, при этом три страны – Индия, Китай и Нигерия – составят 35% от общего прироста мирового городского населения с 2018 по 2050 год [81; 112, с. xvi]. Динамика процессов урбанизации показана на рисунке 1.3.

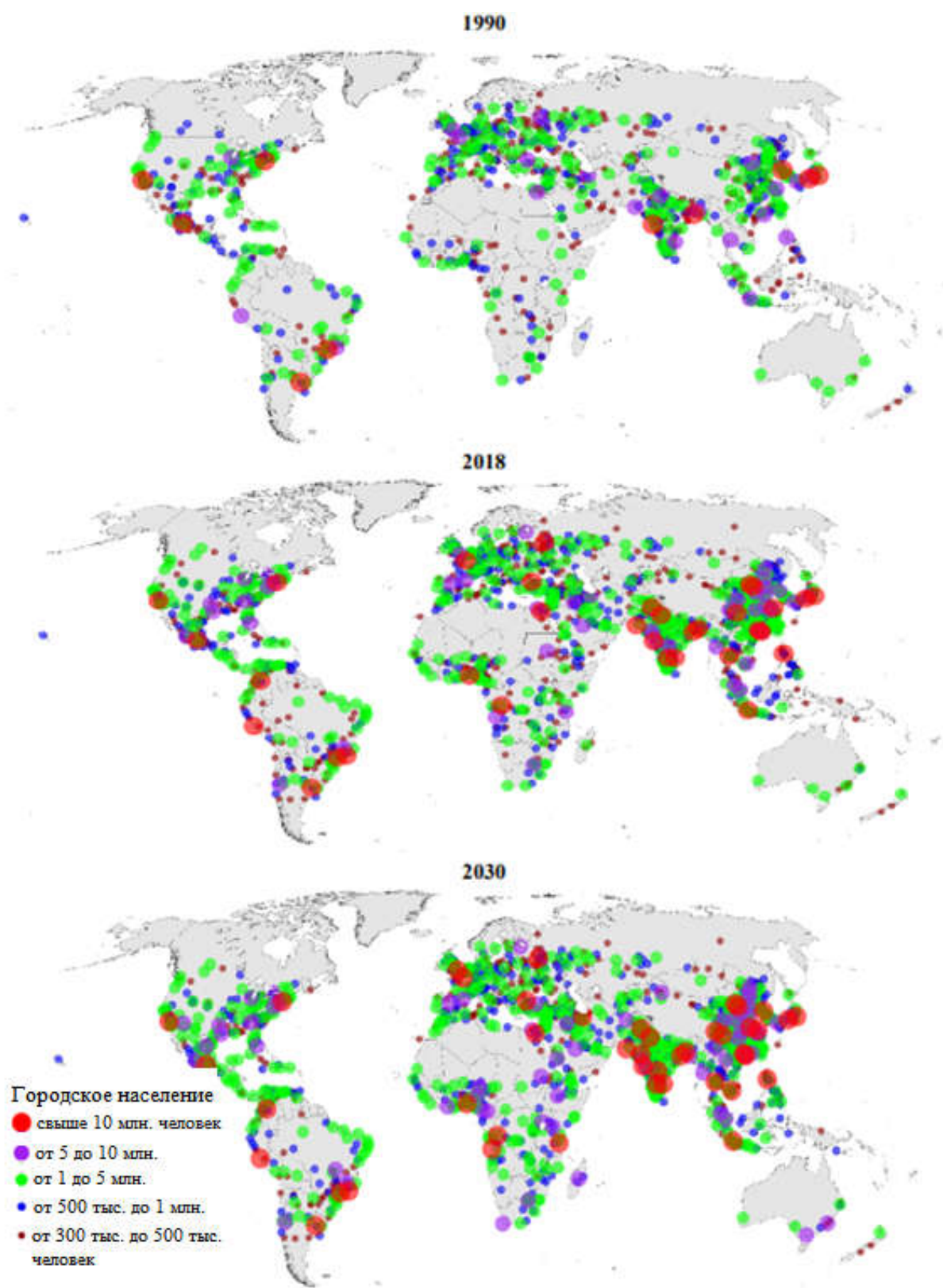
---

<sup>8</sup> <https://worldpopulationreview.com/cities> (accessed September 21, 2024)

Таблица 1.7 – Двадцать пять крупнейших городских агломераций, ранжированных по численности населения в 2020 году, 1950–2035 годы

Страна	Агломерация	Численность населения по годам, млн чел.				Городское население по годам, %			
		1950	1990	2020	2035*	1950	1990	2020	2035*
Япония	Токио	11	33	37	36	25,5	33,8	32,2	32,6
Индия	Дели	1	9	30	43	2,1	4,2	6,3	6,4
Китай	Шанхай	4	9	27	34	6,6	2,8	3,1	3,2
Бразилия	Сан-Паулу	2	15	22	24	12	13,4	11,8	11,8
Мексика	Мехико-Сити	3	16	22	25	28,2	25,7	20,2	19,6
Бангладеш	Дакка	0,34	7	21	31	20,7	31,5	32,4	33,2
Египет	Каир	2	10	21	29	37,7	39,6	47,5	47,5
Китай	Пекин	2	7	20	25	2,6	2,2	2,3	2,4
Индия	Мумбаи (Бомбей)	3	12	20	27	4,8	5,6	4,2	4,0
Япония	Кинки М.М.А. (Осака)	7	18	19	18	15,8	19,1	16,5	16,6
США	Нью-Йорк- Ньюарк	12	16	19	21	12,1	8,5	6,9	6,6
Пакистан	Карачи	1	7	16	23	16	21,7	20,8	20,6
Китай	Чунцин	2	4	16	21	2,4	1,3	1,8	1,9
Турция	Стамбул	1	7	15	18	18,2	20,5	23,8	24,1
Аргентина	Буэнос-Айрес	5	11	15	17	46,1	39,2	36,1	35,8
Индия	Калькутта	5	11	15	20	7,2	4,9	3,1	2,9
Нигерия	Лагос	0,325	5	14	24	9,2	16,8	13,4	13,2
Конго	Киншаса	0,202	4	14	27	8,7	34,7	35,1	35,2
Филиппины	Манила	1,5	8	14	19	30,6	27,4	26,8	26,4
Китай	Тяньцзинь	2	5	14	16	3,8	1,5	1,6	1,6
Бразилия	Рио-де-Жанейро	3	10	13	15	15,5	8,8	7,2	7,2
Китай	Гуанчжоу, про- винция Гуандун	1	3	13	17	1,6	1,0	1,5	1,6
Пакистан	Лахор	0,836	4	13	19	12,7	12,1	16,3	17,0
Россия	Москва	5	9	13	13	11,8	8,3	11,7	11,8
США	Лос-Анджелес Лонг-Бич–Санта- Ана	4	11	12	14	4	5,7	4,5	4,4

Составлено по данным источника [111]; \* – прогноз



Источник: [89, с. 65]

Рисунок 1.3 – Существующая и ожидаемая динамика процессов урбанизации в мире в XX – XXI вв.

Как видно из рисунка 1.3, за интервал времени 40 лет основные центры урбанизации переместятся из Европы и США в Юго-Восточную Азию и Индию. Высокие темпы урбанизации будут наблюдаться в Африке. При этом на фоне всего мира процессы урбанизации и роста агломераций в России выражены слабо.

Российская империя в 1914 году по количеству населения занимала первое место среди цивилизованных государств (без их колоний) [113, с. 58]. В 1880 году в стране (по состоянию на 1 января без учета Финляндии) проживало 98 млн человек, к 1894 году это число возросло до 123 млн, к 1914 – до 175 млн, прирастая на 2,3 млн ежегодно [113, с.58; 114: ч.1, с. 133]. В период с 1902 по 1912 год прирост населения увеличился до 3,7 млн в год, чему не помешали даже революция 1905 года и Русско-Японская война [115]. Средняя рождаемость в России на 1 000 жителей составляла 47,9 детей, а средняя смертность 32,1 детей, средний прирост определялся в 15,8 детей на 1 000 жителей [113, 116]. Это был самый высокий прирост населения среди основных стран в то время. США занимали второе место в мире по людности с населением 98 млн человек [92, 113].

Однако в указанный период Российская империя была по большому счету аграрной страной. По соотношению численности городского (15%) и сельского (85%) населения страна занимала одно из последних мест в ряду крупнейших государств начала XX века [107; 113 с. 51]. Количество городов в это время составляло 892 [116: 1909 г. с. 26]. Прошедшие десятилетия после указанного периода многое изменили. Войны, социальные потрясения, территориальные потери в результате Первой мировой войны и Октябрьской революции (Финляндия и Польша) и т.д. привели к тому, что население СССР к 1930 году составило 157 млн человек [108].

Оценки ряда исследователей показывают, что при сценарии «без потрясений» население России выросло бы за период с 1897 по 2000 годы на 291% (до 258 млн чел.) [90, с. 297]. Две мировые войны, революция

1917 года, гражданская война, голод, эпидемии того времени, эмиграция и т.п. привели к потере около 79% возможного прироста населения (155 млн чел.) [90, с. 297], в том числе Вторая мировая война стоила России 13% населения (15 млн чел.) [90, с. 300]. Это был драматичный катаклизм столетия.

В 1970 году географ Чонси Харрис назвал Советский Союз землей больших городов [73]. Их тогда было больше, чем в США. В XXI веке Россия остается одной из наиболее урбанизированных крупных стран мира; по разным оценкам в городах страны живет около 3/4 населения страны: 74,4% по данным ООН<sup>9</sup> (на 2018 г.) и 74,9% по более актуальным (на январь 2024 г.) оценкам Росстата<sup>10</sup>. При этом общее число городов<sup>11</sup> (по состоянию на 18.06.2024) составило 1125, большинство из которых, более 70%, – это малые и средние города.

По оценкам Института географии Российской академии наук (данные переписи 1989 г.), в СССР к 1990 году сложилось 108 крупногородских агломераций (на базе городов-центров с населением свыше 250 тыс. жителей), из них в России – 49. Указанные 49 агломераций объединяли 332 города (32% всех городов России) с населением 65 млн жителей (44% всего и 60% городского населения России). По сравнению с 1959 годом количество крупных городских агломераций в России увеличилось в 1989 году почти вдвое (26 и 49).

В 2015 году в России насчитывалось уже 124 сформировавшиеся и формирующиеся агломерации, в которых проживало 85 млн человек, в том числе: 17 агломераций с численностью населения свыше 1 млн чел. каждая; 28 агломераций с численностью от 500 до 999 тыс. чел.; 45 агломераций

---

<sup>9</sup> World Urbanization Prospects. Department of Economic and Social Affairs, United Nations. 2018. <https://population.un.org/wup/downloads> (accessed February 12, 2025)

<sup>10</sup> Витрина Статистических данных. Доля городского населения в общей численности населения на 1 января 2024 года; <https://showdata.gks.ru/report/278932/> (дата обращения 12.02.2025)

<sup>11</sup> Источник: [ru.wikipedia.org/wiki/Список\\_городов\\_России](https://ru.wikipedia.org/wiki/Список_городов_России) (29.09.24)

имели численность населения от 250 до 499 тыс. чел. каждая; 34 агломерации с численностью населения от 100 до 249 тыс. чел. [5, с.42].

По состоянию на 1 октября 2021 года по итогам Всероссийской переписи населения насчитывалось, по версии Фонда «Институт экономики города», 46 агломераций с численностью населения свыше 500 тыс. чел., из которых 25 имели более 1 млн жителей [117]. При этом, как и в остальном мире, преобладают моноцентрические агломерации с одним городом-ядром, который подчиняет своему влиянию все населённые пункты его пригородной зоны.

Наиболее значительные изменения в эволюции внутренней структуры городской системы России наблюдаются в развитии более крупных городских агломераций, оказывающих все большее влияние на социально-экономическое и технологическое развитие страны.

Распределение людности крупнейших городов России далеко от соответствия правилу ранг-размер: Москва больше Санкт-Петербурга в 2,35 раза, а в рамках агломераций – в 2,7–2,8 раза. Населения в обеих столицах больше, чем во всех остальных 13 городах-миллионниках [75]. Простейший индикатор, коэффициент главенства населения первого города к суммарному у трех следующих, приведен в таблице 1.8 наряду с некоторыми другими параметрами сетей больших городов ряда стран. Именно по этому признаку Россия лидирует, близки к ней только Индонезия и Япония.

Средние города, где живут от 50 до 100 тыс. человек, давно стали слабым звеном структуры: их меньше, чем больших, и в 5 раз меньше, чем малых. Среднее количество населения таких городов в 2021 г. составило 75 тыс. чел.; в 1989 оно достигало 90 тыс. чел. Число поселков городского типа сократилось на 100 с лишним, до 1182, а со времен СССР – более чем на 1000, в 1,9 раза. Средняя людность поселков городского типа не достигает 6 тыс. чел., малых городов – 20 тыс. чел. [75].

Таблица 1.8 – Показатели больших городов в странах мира, 2021 год

Страна	Число больших городов	Доля в населении страны, %	Средний размер города, тыс. чел.	Коэффициент главенства 1/2–4	Тыс. км <sup>2</sup> территории/1 город
Россия	167	52,2	456,6	1,49	102,5
США	326	29,1	301,8	0,94	29,2
Канада	51	50,9	382	0,76	195,9
Бразилия	229	43,6	398,5	0,90	37,2
КНР	425	25,6	872,5	0,66	22,6
Индия	436	14,1	456,0	0,72	7,5
Индонезия	134	18,9	392,0	1,47	14,2
Австралия	19	67,1	915,5	0,56	404,8
Япония	204	60,3	370,6	1,0	1,9

*Примечание. К большим городам отнесены города, в которых проживает 100 тыс. чел. и более, средние – города с 50–100 тыс. жителей, малые – с менее 50 тыс. жителей. Составлено по данным World Population Review 2021 (<https://worldpopulationreview.com>) и расчетам А.И. Трейвиша [74]. Источник: [75]*

За время после переписи населения 2010 года концентрация населения в главных городских агломерациях и депопуляция межагломерационных пространств ускорились на фоне незначительного роста населения всей страны за счет международной миграции.

При стремительном росте самых крупных агломераций (Московской (21,8 млн чел. на 01.01.24), Санкт-Петербургской (6,5 млн чел.), Екатеринбургской (2,4 млн чел.) и др.), некоторые ранее крупные агломерации (например, Новокузнецкая<sup>12</sup> (1,3 млн чел.)) теряют свое население или поддерживают его на прежнем уровне, в том числе за счет административно-территориальных преобразований [75]. Процесс концентрации населения в центре европейской части России позволяет говорить о формировании очень крупного Центрального мегалополиса. Этот формирующийся мегалополис включает поселения Московской агломерации в Московской области и в непосредственно окружающих её областях, а также поселения

<sup>12</sup> Доступ по ссылке: [https://urbaneconomics.ru/sites/default/files/perepis\\_aglomeracii.pdf](https://urbaneconomics.ru/sites/default/files/perepis_aglomeracii.pdf) (09.09.24)

по оси Москва-Владимир-Нижний Новгород. С улучшением транспортной связности территории этот процесс будет только усиливаться.

Процесс такого формирования уже виден на примере Московского региона, как ядра мегаполиса, где население выросло с 15,6 млн чел. в 1990 г. до 20,4 млн чел. в 2020 г., при этом доля столичного региона в населении страны увеличилась с 10,6 до 14,0%. Ежегодный миграционный прирост в Московской агломерации достигает 250 тыс. чел. За 1991–2020 гг. чистый миграционный приток в Московскую агломерацию составил 6,4 млн чел. На рубеже 2010-х годов до 60% чистой миграции внутри России приходилось на Москву и Подмоскowie. В результате к 2021 году население столичной городской агломерации почти сравнялось с суммарной численностью населения остальных городов-миллионников [75].

Определение «мегаполис» Москва получила в конце XIX века, когда перепись 1897 года зафиксировала 1 миллион городских жителей. За прошедшие 125 лет население Москвы выросло до 15 млн человек, что отражает наиболее высокие темпы урбанизации среди столиц в Европе.

Отметим, что процесс создания крупных агломераций в России начался сравнительно недавно. Градостроительные проекты регионального и федерального уровня – Генеральная схема расселения на территории России и групповые системы населенных мест (ГСНМ) – были разработаны к началу 1990-х годов как централизованно-плановые альтернативы малоуправляемым агломерациям многих зарубежных стран.

Проекты развития крупных городов с прилегающими территориями направлены на получение синергетического эффекта от объединения городских образований, расширения границ рынков сбыта продукции, эффективного развития инфраструктуры и производительных сил. Именно это стало основой того, что в период 2004–2009 гг. в России реально декларируется создание ряда агломераций. Естественно, что интенсивное укрупнение городских агломераций, формирование их в форме

мегаполисов является естественным ходом эволюционных процессов урбанизированных территорий.

Таким образом, Россия, как и мир в целом, будет еще больше урбанизироваться в течение следующего десятилетия, по оценкам уровень урбанизации возрастет с 74,9% сегодня до 83,3% к 2050 году [81, 94, 112]. Ожидается, что крупные регионы страны станут более урбанизированными, темпы роста городов замедлятся. Все это будет наблюдаться на фоне снижения количества населения в России к 2040 году до 135–140 млн чел. (2025 год – 146 млн чел.).

Процессы урбанизация приводят как к положительным, так и негативным последствиям в развитии общества. Города и мегаполисы – это центры экономического и культурного производства, места пространства экологического и социального развития. Городские территории формируют возможности, где реализуются стремления людей в областях социального, экономического и технологического развития. Как правило, экономика любой агломерации в секторах технологического производства и высококвалифицированных услуг более развита по сравнению с экономикой внеагломерационных территорий.

Процессы развития городов формируют социально-экономическую среду, при которой рост доходов населения тесным образом связан с уровнем урбанизации территории или региона. Например, в странах с высоким доходом в 2018 году уровень урбанизации был более чем в два раза выше, чем в странах с низким доходом (81% по сравнению с 32%).

Хорошо спланированная международная и внутренняя миграция, составляющая около одной трети роста городов в развитых странах, все больше преобразует городские районы в гетерогенные, многоэтнические, многокультурные и многоязычные пространства. Культурное разнообразие диаспор и этнических групп способствует яркости, процветанию, конкурентоспособности, привлекательности, позитивному восприятию и

общему развитию городов. Города с культурным разнообразием более прогрессивны, поскольку они получают выгоду от международных связей в области знаний, торговли и привлечения рабочей силы.

Концентрация финансовых ресурсов в городах приводит к росту городских бюджетов и относительно быстрому социально-экономическому развитию. Внедрение технических новшеств, прогрессивное развитие бизнеса и инфраструктуры, передовые решения в области транспорта и телекоммуникаций свойственны именно развитым агломерациям. Крупные города более успешны в международном разделении труда и привлечении инвестиций.

Наряду с позитивными последствиями, урбанизация приводит и к ряду отрицательных аспектов развития, связанных с изменением в образах жизни, загрязнением окружающей среды, жилищными и транспортными проблемами, ростом уровня преступности и т.д. Жители многих городов страдают от неравенства и изоляции, неадекватной инфраструктуры, неравномерного доступа к основным услугам и отсутствия экономических возможностей для молодежи.

Территориальное разрастание городов становится все более распространенным негативным явлением. В период с 1990 по 2015 год города в развитых странах увеличили свои городские территории в 1,8 раза, в то время как городское население увеличилось в 1,2 раза. В случае развивающихся стран за тот же период городское землепользование увеличилось в 3,5 раза, в то время как городское население увеличилось в 1,5 – 2 раза. К 2030 году города, как ожидается, будут занимать в три раза больше земли, чем в 2000 году, при этом большая часть расширения будет происходить в относительно нетронутых природных территориях [112].

Для более чем двух третей городского населения мира неравенство доходов увеличилось с 1980 года. Этот означает, что около 2,9 млрд человек живут в городах, где неравенство доходов в настоящее время

более выражено, чем поколение назад. Сегодня во многих городах США, Великобритании, Латинской Америки, Карибского бассейна и Африки уровень неравенства существенно выше, чем на остальных территориях этих стран [112]. Темпы роста городской бедности в мире выше, чем темпы роста городского населения мира. Этот факт подразумевает, что городская доля бедности увеличивается с ростом темпов урбанизации, что приводит к большей концентрации бедности в городских районах.

В настоящее время в мире насчитывается 763 миллиона внутренних мигрантов и 272 миллиона международных мигрантов [112]. Хотя неконтролируемая миграция является движущей силой урбанизации, проблемы городов, где оседают в основном мигранты, очень актуальны. Сопутствующая городской миграции бедность, преступность, низкое качество рабочей силы, этнические особенности и т.д. приводят к деградации многих городских территорий.

Глобальная проблема урбанизации, связанная с тем, что доступное жилье остается недостижимым, свойственна практически всем городам. Только 13% городов мира имеют доступное жилье [112]. Жители в городах тратят непропорционально большую часть своих доходов на жилье.

Несмотря на тенденцию старения населения в развитых странах в настоящее время молодежь и дети в совокупности составляют почти 40% населения мира. Прогнозируется, что к 2030 году 60% городских жителей в развивающихся странах будут моложе 18 лет [112]. Большое количество молодого населения создает проблему безработицы среди молодежи, которая в два-три раза выше, чем безработица среди взрослых.

Мировое сообщество ставит перед собой актуальные задачи в области развития городов. Единогласное принятие в 2015 году Повестки дня в области устойчивого развития на период до 2030 года, которая включает цель «сделать города и населенные пункты инклюзивными, безопасными и устойчивыми», а также Новой городской повестки дня

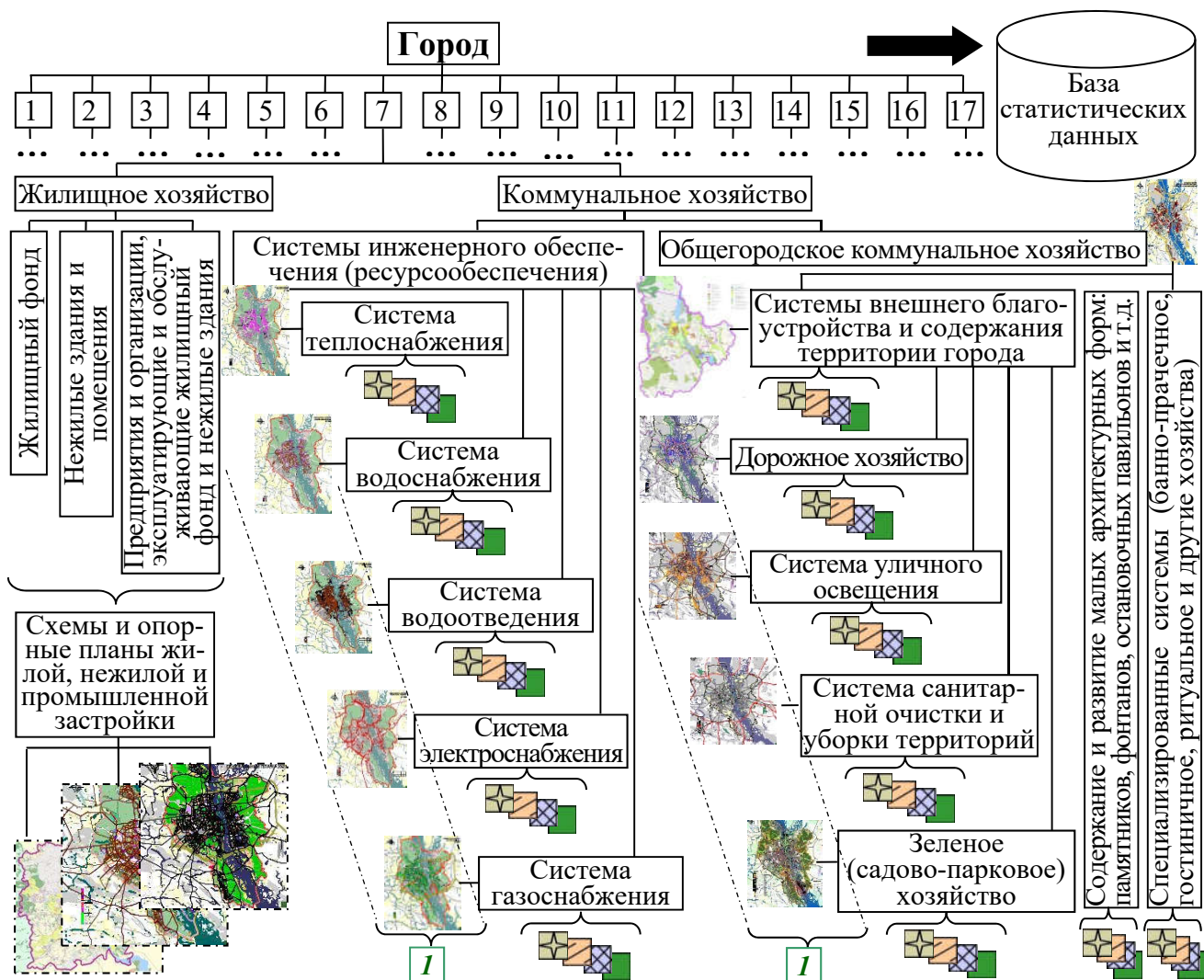
(NUA) в 2016 году, прочно выводит урбанизацию на передний план международных дискуссий по вопросам развития.

Куала-Лумпурская декларация о городах 2030, принятая на Девятом Всемирном форуме городов в 2018 году, признала ряд тенденций и проблем, типичных для нашего все более урбанизированного мира, таких как ограниченные возможности для коллективного градостроительства, неравный доступ к городской жизни, а также недостаточная защита от нарушений прав человека, таких как принудительные выселения.

Сегодня признано, что города стимулируют экономический рост, инновации и большую общественную свободу. Урбанизация, таким образом, представляет собой возможность, которую можно использовать для повышения благосостояния населения всех стран.





#### **1.4.2 Город как система и урбанизированная территория**

Городское хозяйство современного города включает в себя территории промышленной, селитебной и общественно-деловой застройки, различные городские службы, предприятия и объекты, инженерные сети жилищного хозяйства, сети коммунальной инфраструктуры, бытового обслуживания населения, торговли и общественного питания, транспорта, связи и т.д. [76, 118]. Планировочная структура города выражается во взаимном расположении основных функциональных зон и системе связей между ними. В соответствии с Санитарными нормами и правилами [3], а также Градостроительным Кодексом [2] определены составляющие элементы и требования к проектированию застройки каждой функциональной зоны города. На рисунке 1.4 приведена структурно-функциональная схема современного города, а в таблице 1.9 даны основные функции города и городских подсистем.



### Условные обозначения

Схемы структурных связей:

 — функциональная; 
  — организационная; 
  — технологическая; 
  — ресурсная.

**1** — схемы и опорные планы инженерно-технических систем и систем благоустройства

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Подсистемы города	Административно-территориального устройства	Население	Финансово-экономическая	Строительного комплекса	Промышленного производства и энергетики	Транспортная	Жилищно-коммунального хозяйства	Информатизации и связи	Здравоохранения	Образования	Реализации товаров и услуг	Управления градостроительством	Управления имуществом и земельными ресурсами	Оздоровления и охраны окружающей среды	Общественной безопасности	Социально-культурная	Спортивно-оздоровительная

Источник: авторская разработка [47, 49]

Рисунок 1.4 – Структурно-функциональная схема города

Таблица 1.9 – Матрица зависимости функций города и его подсистем

№ п.п.	Наименование функций города	Подсистемы города																
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	Административно-управленческая																	
2	Финансово-экономическая																	
3	Производственная																	
4	Коммунально-хозяйственная																	
5	Строительная																	
6	Транспортная																	
7	Информационно-коммуникационная																	
8	Торговая																	
9	Социально-бытовая																	
10	Медико-здравоохранительная																	
11	Научно-образовательная																	
12	Управления градостроительством и земельными ресурсами																	
13	Обеспечение безопасности жизнедеятельности																	
14	Культурно-просветительская																	
15	Спортивная																	
16	Природоохранный и рекреационно-туристический																	

Источник: авторская разработка [47, 49]

Анализ структуры существующих генеральных планов городов дал возможность выделить 17 подсистем, позволяющих представить город как сложную пространственно-распределенную систему и урбанизированную территорию.

На рисунке 1.4 подсистема коммунального хозяйства характеризуется более детально в виде иерархической системы, где подсистемы более низкого уровня могут иметь древовидную, сетевую или смешанную структуру.

Аналогичным образом могут быть представлены все 17 основных подсистем города в виде различных иерархических, смешанных и сетевых структур. В целом подсистемы города можно кратко охарактеризовать следующим образом.

1) *Подсистема административно-территориального устройства* служит для реализации публичной власти на принадлежащей городу территории. Данный вид устройства представляет собой организацию

города как системы административно-территориальных единиц, установленную для осуществления функций управления с учетом сложившихся традиций, системы расселения, хозяйственных связей и сформировавшейся инфраструктуры. Административно-территориальное устройство составляет пространственный базис территориально-организационной системы, а управленческую надстройку образует привязанная к административно-территориальному делению система общегосударственных, региональных и местных органов власти.

2) *Подсистема «Население»* представляет собой исторически сложившуюся и непрерывно возобновляющуюся совокупность людей, которая проживает и ведет различные виды деятельности на городской территории. Население является носителем таких человеческих характеристик и функций как потребности, способности, деятельность, социальные отношения и социальные институты, что в совокупности, в целом, образует городской социум. Городское население в своей структуре формирует социально-демографические группы, занимающие различное положение в социуме и характеризующиеся множеством статистических показателей, которые отражают самые разные социальные явления: межличностные и межгрупповые отношения, рождаемость, смертность, брачность, разводимость, миграцию и т.п. Демографические процессы подвержены значительным динамическим изменениям, соответствующие статистические показатели отличаются существенной вариабельностью.

3) *Финансово-экономическая подсистема* направлена на обеспечение хозяйственной деятельности предприятий, городских служб и населения в целом и представляет собой систему финансовых и экономических отношений в городской социальной и хозяйственной среде. В эту сферу входят бюджетные органы государственной власти и местного самоуправления, городские финансовые, налоговые, статистические и

плановые службы, пенсионные фонды и кредитные союзы, банки, страховые и инвестиционные компании, хозяйствующие субъекты, а также домохозяйства.

4) *Подсистема строительного комплекса* охватывает жилищно-гражданское строительство и строительную индустрию местного значения. В состав строительного комплекса входят предприятия и организации, осуществляющие строительство, реконструкцию и капитальный ремонт жилищного фонда, объектов социальной сферы, дорог и других объектов городского хозяйства, предприятия по производству местных строительных материалов, строительных конструкций и т.д.

5) *Подсистема промышленного производства и энергетики* (городские промышленные районы) представляет собой крупные территории с характерной направленностью развития производительных сил, с соответствующей сложившейся материально-технической базой, производственной и социальной инфраструктурой. Промышленные районы с выраженной индустриально-производственной специализацией предназначены для размещения на территории города промышленных предприятий, объектов производства и распределения энергии с соблюдением определенных градостроительных норм и требований.

6) *Транспортная подсистема* предназначена для обеспечения потребности людей в передвижениях. Транспортный комплекс составляют: автопарки, автостоянки, заправочные станции, службы автосервиса, системы электроснабжения городского транспорта, спецслужбы содержания дорожных путей, ж/д и автовокзалы и т.п. Транспортная сеть включает в себя улицы, транспортные линии, внеуличные транспортные линии, в том числе наземные и подземные. Транспортная сеть вместе с городским транспортом образует транспортную инфраструктуру города.

7) *Подсистема жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ)* предназначена для обеспечения всех сфер жизнедеятельности города. Подсистема ЖКХ включает жилищное и коммунальное хозяйство города и обеспечивается функционированием систем инженерного обеспечения городской застройки и общегородского коммунального хозяйства (рис. 1.4).

Жилищное хозяйство включает в себя жилищный фонд, нежилые здания и помещения общественного, социального и иного назначения с сетью обслуживающих их эксплуатационных, ремонтно-строительных и других предприятий и организаций. Коммунальное хозяйство может быть, в свою очередь, разделено на две крупные подсистемы:

- системы инженерного обеспечения (ресурсообеспечения): холодное и горячее водоснабжение, водоотведение, теплоснабжение, газоснабжение, электроснабжение;
- общегородское коммунальное хозяйство, включающее в себя системы внешнего благоустройства и содержания территории города (дорожное хозяйство, уличное освещение, санитарная очистка города, сбор, вывоз и переработка бытовых отходов, зеленое хозяйство и т.п.).

Системы тепло-, водо-, газо и электроснабжения представляют собой комплексы инженерных сооружений, оборудования, сетей и технических объектов, предназначенных для снабжения населения определенными видами ресурсов и энергии. Общегородское коммунальное хозяйство охватывает дорожное хозяйство с элементами улично-дорожной сети и специализированными предприятиями, системы санитарной очистки города, сети уличного освещения, предприятия зеленого и садово-паркового хозяйства и т.д.

8) *Подсистема информатизации и связи.* В эту сферу входят средства массовой информации (печать, радио, телевидение), телефон, почта, средства телекоммуникаций, в том числе сети мобильной связи и Интернет и т.д. Соответствующие информационно-коммуникационные

системы представляют собой комплексы оборудования, сетей и технических объектов, обеспечивающих связь и передачу информации.

9) *Подсистема здравоохранения* служит для удовлетворения потребностей населения в услугах сферы здравоохранения на уровне, регламентированном действующим законодательством. Муниципальная система здравоохранения включает лечебно-профилактические и другие медицинские учреждения системы здравоохранения, ведомственные и фармацевтические учреждения, а также органы управления охраной здоровья населения. Медицинские учреждения в городах представлены многопрофильными поликлиниками и стационарами, стоматологическими поликлиниками, пунктами скорой медицинской помощи и т.д.

10) *Подсистема образования* объединяет все функционирующие на территории города учреждения учебно-воспитательного профиля, основной целью которых является образование обучающихся в этих учреждениях. Городская система образования включает дошкольные заведения, общеобразовательные школы, различные училища и техникумы, колледжи, высшие учебные заведения различного уровня, а также соответствующие органы управления в сфере образования.

11) *Подсистема реализации товаров и услуг* охватывает сети магазинов, рынков, предприятий общественного питания, хлебозаводов, молокозаводов, оптовых баз, складов, системы хранения продукции и вспомогательные цеха и т.д. Бытовое обслуживание населения обеспечивается предприятиями услуг, мастерскими и службами ремонта, пунктами проката и т.д.

12) *Подсистема управления градостроительством (градостроительной деятельностью)* направлена на регулирование плановой, проектной и градостроительной деятельности на местном уровне с учетом особенностей городских поселений. Градостроительный

комплекс формирует систему градостроительных предприятий, учреждений и организаций, а также органов управления, которые осуществляют градостроительную деятельность в виде территориального планирования, градостроительного зонирования, архитектурно-строительного проектирования, строительства, капитального ремонта, реконструкции объектов капитального строительства, инженерной подготовки городов и т.д. Градостроительное планирование развития территорий и поселений и их застройка осуществляются посредством разработки градостроительной документации, которая включает территориальные комплексные схемы градостроительного планирования развития территорий, генеральные планы, проекты развития поселений, застройки кварталов, микрорайонов и других элементов планировочной структуры поселений [2, 3, 77, 119–122]. Основные направления градостроительного развития поселения, его цели и задачи на ближайшую и долгосрочную перспективы определены Генеральным планом развития города [123].

13) *Подсистема управления имуществом и земельными ресурсами* направлена на обеспечение потребностей городской системы в природно-хозяйственных ресурсах при сохранении и воспроизводстве ее природного и экономического потенциала. В состав муниципальной собственности входят: средства местного бюджета, муниципальные внебюджетные фонды, имущество органов местного самоуправления, муниципальные земли и другие природные ресурсы, различные предприятия и организации, жилищный фонд, нежилые здания и помещения, объекты инженерной инфраструктуры, общегородского коммунального и жилищного хозяйства, земельные территории и участки, обособленные водные объекты и т.п. Управление земельными ресурсами направлено на проведение рационального землеустройства, организацию и ведение земельного кадастра, регистрацию прав на землю и т.д.

14) *Подсистема оздоровления и охраны окружающей среды* направлена на обеспечение благоприятных и безопасных условий среды обитания и жизнедеятельности человека на территории города за счет соблюдения требуемых санитарно-гигиенических условий жизни населения и ограничения негативного влияния человеческой деятельности на природу. Данная подсистема охватывает совокупность компонентов природной среды, природных, природно-антропогенных и антропогенных объектов, а также общегородские органы управления и контроля в области природоохранной деятельности.

15) *Подсистема общественной безопасности.* Безопасность жизнедеятельности на территории города обеспечивают: органы общественной безопасности и соблюдения законности, дорожная служба, пожарная охрана, скорая медицинская помощь, службы гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций, санитарно-эпидемиологическая служба и т.д.

16) *Социально-культурная подсистема* направлена на реализацию материальной, духовной, художественной, религиозной, интеллектуальной, эстетической жизни городского населения и представляет собой социальное пространство, в рамках которого реализуется социально-культурная деятельность. В эту сферу входят творческие объединения и учреждения (театры, филармонии, концертные залы, цирки, библиотеки, музеи, галереи, студии, клубы, специализированные школы, творческие коллективы и учреждения культурно-досугового типа), различные элементы социальных институтов (научные союзы, религиозные организации, добровольные объединения граждан, профсоюзные и политические объединения и т.д.), а также государственные и городские органы управления в этой области.

17) *Спортивно-оздоровительная подсистема (комплекс)* – совокупность объектов и субъектов физкультуры и спорта для формирования здорового и активного образа жизни у населения, реализации спортивно-оздоровительного отдыха и туризма. Сеть физкультурно-спортивных сооружений входит составной частью во все структурные элементы населенных мест и включает спортивные сооружения сети общего пользования, объекты в различных видах общественного обслуживания (дошкольные и учебные заведения, вузы, предприятия и т.д.) и т.д. Основу сети образует подсистема общего пользования, в которой сосредоточена значительная часть физкультурно-спортивных сооружений (бассейны, крупные спортивные залы, катки, велотреки, стадионы, спортивные школы и т.д.).

Каждая из описанных выше подсистем обеспечивает выполнение определенных функций и характеризуется определенной совокупностью статистических показателей и характеристик наблюдения, значения которых определяют состояние и динамику изменения подсистем в процессе их функционирования. Соответствующие значения показателей накапливаются и хранятся в ретроспективных статистических базах данных или базах данных мониторинга и оперативного контроля.

### **1.4.3 Проблема измеримости состояний урбанизированных систем**

Проблема измеримости состояний урбанизированных систем является определяющей при анализе процессов развития городов, так как требует комплексной оценки состояний по совокупности многих показателей. При моделировании социально-экономического положения и развития городов используется многоагентное моделирование сложных объектов, гибридные географические модели городской пространственной

структуры, модели городов как эволюционных систем в случайных средах, моделирование микродинамики городских систем в континуальных пространствах, нейросетевые модели и симуляционные модели развития городов на основе агентов или клеточных автоматов, применяются методы фрактальной геометрии для измерения и моделирования городских систем, способы моделирования многомерных событий в многоуровневых системах городского хозяйства, методы структурно-когнитивного подхода описания городов и территорий и т.д. [68, 124, 125].

В данном случае основным недостатком системной динамики и системного анализа объектов является принятие в процессе моделирования множества допущений и необходимость составления исчерпывающих списков элементов, включаемых в структуру городской системы и ее подсистем. При этом наличие антропогенных и социальных факторов формирует сетевую запутанность системообразующих и функциональных связей и обеспечивает неопределенность в поведении элементов и системы в целом. Неопределенность информации для многих элементов, использование множества переменных состояния и детерминированный подход к формированию моделей для многомерного анализа приводят к низкой точности прогнозирования процессов развития городов. Все это определяет излишнюю сложность моделей, используемых в практике моделирования социально-экономического развития городов, градостроительства, жилищно-коммунального хозяйства и благоустройства территорий.

В свою очередь, использование системодинамического подхода позволяет выявить эмпирические закономерности, а затем на их основе сформулировать гипотезы для построения моделей [28, 47, 58, 68, 124–126]. В этом плане одним из эффективных инструментов являются феноменологические модели, которые позволяют осуществить

макроскопическое описание объектов по имеющимся многомерным статистическим данным.

Однако, чтобы построить такие модели, исходя из феноменологического представления города как сложной структуры, отличающейся множеством измеряемых показателей, необходимо формирование обширных массивов структурированной информации. Для этого необходимо выделение однородной группы таких объектов, например, исходя из системного представления, что город – это экземпляр класса в классе городов. При этом одна из основных проблем урбанистики связана с ответом на вопрос: можно ли предложить объективные системы комплексных измерений состояний городов, которые зависят от множества показателей и характеризуют в целом систему в определенном аспекте или ту или иную городскую подсистему [28, 58, 127–131]. В теории систем под состоянием системы (объекта) понимают мгновенную оценку значений ее показателей (параметров) в определенный момент или интервал времени. В этом случае основным объектом измерений и моделирования является состояние системы, которое определяется, с одной стороны, параметрами свойств, а, с другой стороны, – комплексными мерами, отнесенными ко всей группе наблюдаемых объектов в целом. Основная задача в области комплексных измерений для однородного класса объектов состоит в установлении закономерностей в виде уравнений состояния, которые определяют взаимосвязь параметров свойств объектов как в статике, так и в динамике. Для этого требуется на основе выбранных мер сходства состояний построить измерительную шкалу для их относительного сравнения между собой.

Таким образом, решение задачи измеримости состояний объектов по комплексу показателей становится актуальным и возможным для случая, когда в предметной области науки имеются обширные базы данных опытной или статистической информации [28, 58, 128–134].

При изучении инфраструктурного, жилищно-коммунального, экономического и социального состояния городов используются базы данных показателей муниципальных образований, которые имеются в открытом доступе в службе государственной статистики. Например, база данных статистического учета показателей, характеризующих состояние экономики, социальной сферы и ЖКХ муниципальных образований Российской Федерации, включает информацию по каждому из 22,8 тысячи муниципальных образований. Соответствующая информация с ретроспективой в один год разделена на группы показателей:

- инфраструктура (7 показателей);
- население (13 показателей);
- занятость и заработная плата (16 показателей);
- коммунальная сфера и ЖКХ (24 показателя);
- социальная поддержка населения (4 показателя);
- здравоохранение (1 показатель);
- социальное обслуживание населения (14 показателей);
- образование (7 показателей);
- спорт (5 показателей);
- организация отдыха, развлечений и культуры (28 показателей);
- охрана окружающей среды (6 показателей);
- переработка отходов (4 показателя);
- сельское хозяйство (37 показателей);
- строительство жилья (6 показателей);
- деятельность предприятий (4 показателя);
- розничная торговля и общественное питание (14 показателей);
- бытовое обслуживание населения (6 показателей);
- организация охраны общественного порядка (4 показателя);
- почтовая и телефонная связь (5 показателей);
- фонды и инвестиции (9 показателей);
- финансовая деятельность (58 показателей).

Кроме указанных 272 показателей в базе данных имеются 39 показателей для оценки эффективности деятельности органов местного самоуправления городских округов и муниципальных районов.

В свою очередь, при изучении состояния городов используются базы данных наблюдений при мониторинге и оперативном контроле различных показателей, которые ведут ведомственные субъекты городского мониторинга, например, при контроле загрязнения окружающей среды, отслеживании характеристик работы инженерного оборудования и городских сетей, сборе информации о безопасности городских объектов и данных общественной безопасности, дорожного движения и т.д.

Собираемые ведомственными субъектами мониторинга массивы данных обычно не находятся в открытом доступе, сбор данных осуществляется по утвержденным ведомствами методикам и регламентам, необходимая информация разбросана по очень большому количеству источников. Например, только при контроле загрязнения атмосферного воздуха в городах Федеральной службой по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды осуществляются наблюдения в 221 городе России. Программы мониторинга качества атмосферного воздуха включают контроль основных загрязняющих веществ: пыль, диоксид азота, диоксид серы, оксид углерода, формальдегид, свинец, бенз(а)пирен, тяжелые металлы, специфические загрязняющие вещества и т.д.

Мониторинг и контроль качества среды в городах ведется за состоянием земельных ресурсов, атмосферного воздуха, почв, поверхностных и грунтовых вод, растительного и животного мира, за природно-климатическими и геологическими условиями и ландшафтом, шумовым режимом и радиационным фоном, геохимической природной активностью, состоянием памятников истории и культуры и т.д.

Практически для всех 17 выделенных в разделе 1.4.2 городских подсистем существуют подобные базы данных наблюдений, где хранятся

миллионы ретроспективных данных. Однако изучение российских городов и агломераций в настоящий момент наталкивается на проблему доступности ведомственных информационных баз, что сдерживает в практическом плане развитие урбанистики как междисциплинарной науки.

Исходя из представленных выше материалов, следует, что комплексное измерение состояний урбанизированных систем должно осуществляться по совокупности показателей (переменных состояния), которые однозначно характеризуют ту или иную городскую подсистему в определенном аспекте. С этой целью при описании подсистем необходимо построить среду моделирования в виде многомерного пространства состояний  $E^n$ , где координатные оси соответствуют параметрам свойств  $z_1, z_2, \dots, z_n$ , которые принимаем в качестве переменных состояния. Значения данных величин определяют положение произвольного состояния  $M$  в пространстве  $E^n$ . В таком представлении состояния объектов будут изображаться точками  $M$  многомерного пространства  $E^n$ , а процессы изменения состояний  $l$  – линиями этого пространства, которые параметрически зависят от времени  $\tau$ . В этом случае комплексные измерения состояний объектов будут связаны с выбором эмпирических мер сходства  $\theta$  между состояниями  $M$  в пространстве  $E^n$ , которые могут быть представлены различными геометрическими, вероятностными или эмпирическими мерами. При этом каждому состоянию  $M$  присваивается свое значение эмпирической меры, причем мера сходства  $\theta$  должна четко определять положение каждой точки  $M$  в пространстве  $E^n$ .

Измерительная шкала для оценки состояний объектов в пространстве  $E^n$  может быть построена при условии существования уравнения состояния для изучаемого класса объектов вида  $\theta = \theta(z_1, z_2, \dots, z_n)$ . Если на основе опытных данных для объектов одного класса будет установлено

такое уравнение хорошего качества, то в этом случае можно говорить о возможности измерения состояний объектов. Это дает возможность эмпирического обоснования величины  $\theta$  как особой функции, характеризующей состояния объектов в пространстве  $E^n$  по совокупности значений параметров. Исходя из уравнения состояния, величину  $\theta$  можно определить как эмпирическую меру отклонения состояния изучаемого объекта от опорного состояния, стандартизированного для изучаемого класса объектов.

Особо отметим, что задача сравнения между собой состояний объектов сводится к выбору оптимальных систем измерения. Решению данной задачи и будет посвящен ряд разделов данной книги.

#### **1.4.4 Комплексная оценка как инструмент стратегического планирования**

В городах, которые приняли к руководству принципы сбалансированного и устойчивого развития, на первое место выходит обеспечение высокого уровня и качества жизни горожан при сохранении природных систем. В этом плане развитый город представляется по меркам страны городом с высокими доходами и небольшой стоимостью проживания, территорией с развитой транспортной инфраструктурой и благоустроенными общественными и зелеными зонами, с общедоступным и высоким качеством услуг в области образования, здравоохранения и жилищно-коммунальной сферы, а также с комфортными санитарно-гигиеническими условиями окружающей среды и разнообразной природной средой пригородов.

Поэтому основной целью городского развития является создание благоприятных условий для обеспечения всех сфер жизнедеятельности

города на основе роста экономических показателей, уровня развития городской инфраструктуры, ресурсной базы служб и предприятий, а также сферы услуг при одновременном учете экологических приоритетов.

Городское планирование, применение научно-обоснованного подхода к городскому проектированию, включает в себя оптимизацию землепользования, градостроительства, транспорта, жилищно-коммунальной сферы и других основных подсистем для достижения стратегических направлений развития. Непрерывный процесс комплексного планирования охватывает определение общих целей, а также сбор данных для оценки городских процессов и обоснования плановых решений и мероприятий. Планирование часто предполагает альтернативные решения, предусматривающие различные варианты развития подсистем городов.

Для достижения основных экономических, социальных и экологических целей и приоритетов комплексного и сбалансированного развития разрабатываются<sup>13</sup> Стратегии развития городов на среднесрочную и долгосрочную перспективы, которые являются основанием для улучшения качества прогнозов социально-экономического развития городов, разработки государственных программ<sup>14</sup> и планов мероприятий их социально-экономического развития, схем территориального планирования, а также Генеральных планов городов<sup>15</sup>. Особое внимание при этом должно уделяться разработке прогнозов на

---

<sup>13</sup> Перечень, порядок разработки документов и горизонты планирования в России определяет Закон РФ от 28.06.2014 N 172-ФЗ «О стратегическом планировании в Российской Федерации»

<sup>14</sup> Методические рекомендации по согласованной подготовке и реализации документов планирования развития муниципальных образований / Л.Ю. Падиля Сароса, Л.В. Перцов, В.Ю. Прокофьев, Э.К. Трутнев, К.В. Холопик, С.А. Крымов. М.: Институт экономики города. 2010. – 112 с.

<sup>15</sup> Разработка схем территориального планирования районов и Генеральных планов городов субъекта РФ определена Градостроительным кодексом РФ (Федеральный закон от 29.12.04 № 190-ФЗ)

среднесрочную перспективу как связующему звену при переходе от Стратегий долгосрочного<sup>16</sup> развития к краткосрочному планированию<sup>17</sup>.

Стратегическое планирование развития городов позволяет:

- определить приоритеты и оценить значения возможных количественных и качественных показателей развития регионов и городов;
- определить условия и тенденции развития, выявить угрозы и обусловленные ими социально-экономические и экологические риски;
- оценить потенциальные возможности природных, экономических, финансовых и социальных ресурсов регионов и городов для достижения целей и решения поставленных задач;
- сформировать сценарии развития для составления прогнозов, социально-экономических планов и разработки мероприятий, обеспечивающих достижение целей и решение задач социально-экономического развития.

Организация в городах и муниципальных образованиях процесса планирования направлена на реализацию мероприятий социально-экономического, территориального и бюджетного планирования, развитие систем коммунальной и инженерной инфраструктуры, а также подготовку плановых документов.

Основным инструментом при разработке Стратегий развития городов является исследование процессов их функционирования и развития на основе комплексной оценки, что позволяет проанализировать результаты, связанные с реализацией Стратегий, а также других планов или программ.

---

<sup>16</sup> «Сценарные условия долгосрочного прогноза социально-экономического развития РФ до 2030 года» представлены на сайте Министерства экономического развития РФ: [http://www.economy.gov.ru/minec/activity/sections/macro/prognoz/doc20120428\\_0010](http://www.economy.gov.ru/minec/activity/sections/macro/prognoz/doc20120428_0010)

<sup>17</sup> Согласно Закону РФ от 28.06.2014 № 172-ФЗ «О стратегическом планировании в Российской Федерации» основными документами стратегического планирования на региональном уровне являются стратегии развития федеральных округов, стратегии социально-экономического развития субъектов РФ, разрабатываемые с учетом задач обеспечения национальной безопасности, на перспективу 12 и 6 лет соответственно

Комплексная оценка урбанизированных территорий и городских агломераций заключается в анализе состояния и процессов их изменения по совокупности показателей на основе установления соответствия определенным уровням или нормам, выявлении значимых природных, антропогенных, социальных, экономических и биологических факторов и определении масштабов и интенсивности проявления и воздействия этих факторов.

Комплексной оценке при стратегическом планировании подлежат следующие урбанизированные территории и городские агломерации:

- урбосистемы городского типа (агломерации, города, муниципальные образования) и городские территории – для исследования процессов градостроительного и социально-экономического состояния и развития городов, оценки состояния их жилищно-коммунального хозяйства и сферы строительства, а также для изучения загрязнения природных сред, анализа негативных и опасных воздействий на окружающую среду и население;
- регионы и крупные природно-промышленные объекты – для исследования градообразующих, социально-экономических и экологических процессов и оценки человеческого развития, а также для построения моделей состояния объектов и оценки рисков воздействий таких объектов на окружающую среду и человека;
- природные системы – для изучения состояния урбанизированных и природно-антропогенных территорий по показателям экологического состояния и биоразнообразия;
- социальные системы – для изучения поведения и развития социальных групп в городском социуме.

Очевидно, что, в первую очередь, качество жизни неразрывно связано с уровнем доходов горожан и формированием городских бюджетов. Богатые города больше и охотнее вкладывают средства в

развитие инфраструктуры, энергосберегающие технологии, решение социальных и экологических проблем.

Валовый внутренний продукт городов, определяемый общим ВВП, созданным промышленностью и услугами, и отнесенным к общему городскому населению, является самым высоким в развитых странах, достигая почти 50 тыс. \$ США на одного жителя. Данный показатель относительно ниже в странах с переходной экономикой (около 30 тыс. \$ США) и развивающихся странах Азии (20 тыс. \$ США), Америки (15 тыс. \$ США), Океании и Африки (по 10 тыс. \$ США). Другими словами, городские районы развивающихся стран производят меньше продукции на душу населения, чем районы развитых стран.

В свою очередь, успешные города в Европе, как правило, не очень велики, их население не превышает 1–3 млн человек, однако они имеют ВВП от 20–25 тыс. \$ США на душу населения по паритету покупательной способности (ППС).

К примеру, в 2014 году в Европе ВВП на душу населения городских агломераций (по ППС) составил<sup>18</sup>: в Кельне и Дюссельдорфе (Германия) \$41 763, в Париже (Франция) \$57 241, а в таких городах<sup>19</sup>, как: Брюссель (Бельгия), Гамбург (Германия), Бремен (Германия), Вена (Австрия), Стокгольм (Швеция), Прага (Чехия) значение данного показателя составило соответственно \$67 884, \$57 041, \$44 332, \$50 115, \$48 603, \$48 384. В свою очередь, уровень ВВП на душу населения (по ППС) в 2014 году составлял<sup>20</sup> в Москве в \$45 803, а в Санкт-Петербурге – \$22 600.

---

<sup>18</sup> Источник: Brookings Institution, Global Metro Monitor 2014; <https://investmoscow.ru/investment/economic-indicators/investment-in-moscow-is-profitable/the-level-and-place-of-economic-development/> (08.04.24)

<sup>19</sup> Данные Евростата. Regional GDP in the European Union, 2005. Архивировано из первоисточника 16.02.08; <http://ec.europa.eu/eurostat/documents/2995521/5115542/1-12022008-AP-EN.PDF> (08.09.24)

<sup>20</sup> Источник: Инвестиционный портал г. Москвы: <https://investmoscow.ru/investment/economic-indicators/investment-in-moscow-is-profitable/the-level-and-place-of-economic-development/> (05.04.24)

Известно<sup>21</sup>, что Москва входит в десятку крупнейших городских экономик мира, на ее долю приходится 1,4% совокупного ВВП трехсот крупнейших городских агломераций. Город Москва<sup>22</sup> – это 8 % населения, 20 % валового регионального продукта всей страны, почти 20 % инвестиций, вместе с Московской областью – это почти 20 % ввода жилья, около 20 % торговли в России. Все остальные города России (в России всего 1125 городов<sup>23</sup> и из них подавляющая часть – малые и средние города) имеют значения удельного ВВП на душу населения (по ППС) от \$2 500 до \$12 000 (за исключением Южно-Сахалинска, Ханты-Мансийска, Сургута, Норильска и Петропавловска-Камчатского и т.д.).

В 2020–2023 годах агломерации мира имели удельный ВВП на душу населения в размере: агломерация Нью-Йорка (США) – \$121 000; агломерация Большого Токио (Япония) – \$51 500; Лос-Анджелес-Лонг-Бич-Анахайм (США) – \$101 000; Париж (столичный район, Франция) – \$85 800; Лондон (столичный район, Великобритания) – \$79 000; Сеул (столичный район, Южная Корея) – \$35 400; Шанхай (Китай) – \$26 600; Пекин (Китай) – \$30 100; Сингапур (Сингапур) – \$89 800; Дели (столичный регион, Индия) – \$88 000; Большой Мехико (Мексика) – \$13 700; Берлин (столичный регион, Германия) – \$57 200; Рио-де-Жанейро (столичный регион, Бразилия) – \$14 600; Карачи (Пакистан) – \$9 500; Москва (Московская агломерация, Россия) – \$17 400; Санк-Петербург (Россия) – \$22 600.

Исходя из выполненного анализа следует, что только отдельные города России могут достигнуть показателей удельного ВВП на душу населения (по ППС) от \$20 000 до \$25 000 или удельного ВВП на душу

---

<sup>21</sup> Источник: Инвестиционный портал г. Москвы

<sup>22</sup> Источник: FAQ: Развитие городов. 5 фактов о формировании агломераций, процессах субурбанизации и проблеме больших городов в России. Принцип децентрализации: <https://postnauka.ru/faq/38237#!> (20.09.24)

<sup>23</sup> Источник: Список городов России: [ru.wikipedia.org/wiki/Список\\_городов\\_России](https://ru.wikipedia.org/wiki/Список_городов_России) (14.03.25)

населения от \$25 000 до \$30 000 за ближайшие 10–15 лет, однако такая цель должна формироваться уже сегодня.

Следующим важным показателем развития является соотношение темпов потребления земли к темпам роста населения, что характеризует успешность планирования и управления городами (Цель 11.3 ЦУР). Способность городов достигать компактного интегрированного и связанного развития урбанизированных территорий является определяющим фактором в сфере градостроительства, жилищно-коммунального хозяйства и транспортной инфраструктуры.

На качество жизни большое влияние оказывает также формируемая социальная обстановка территории. Социально-ориентированный город отличается высокой продолжительностью жизни, низким уровнем младенческой смертности, значительной рождаемостью, низкими показателями преступности, достойным уровнем пенсионного обеспечения, всеохватывающим доступом к информации, технологиям, образованию и медицинскому обслуживанию, поддержанием и укреплением социальной справедливости, и, в целом, созданием благоприятных условий для развития человеческого потенциала. В свою очередь, для города с благоприятными условиями среды характерны низкий уровень загрязнения воздуха, эффективная система обращения с отходами, удовлетворительная работа коммунальных служб и т.д.

Сегодня на региональном уровне с целью анализа и управления процессами развития разрабатываются 7 документов стратегического планирования, в свою очередь, на муниципальном уровне – 5 документов: стратегия – 1, прогнозы – 2, план – 1, муниципальная программа – 1.

На начало 2025 года в государственной автоматизированной информационной системе «Управление» [135] на региональном уровне было зарегистрировано действующих документов: 69 стратегий социально-экономического развития (без учета муниципальных

образований), 165 прогнозов социально-экономического развития на среднесрочный и долгосрочный период, 32 бюджетных прогноза, 16 планов мероприятий по реализации стратегий, 4 схемы территориального планирования. На муниципальном уровне (без сельских поселений) было зарегистрировано действующих документов: 1537 стратегий социально-экономического развития, 1664 прогноза социально-экономического развития, 622 бюджетных прогноза, 571 план мероприятий по реализации стратегий и 1226 муниципальных программ [135].

Согласно данным Федеральной службы государственной статистики, на 1 января 2025 года число муниципальных образований РФ составляло 17051 единиц, при этом их большинство не имеют стратегий развития.

Наиболее важными документами, определяющими развитие населенных пунктов, являются Генеральные планы городов и муниципальных образований, которые основаны на вариантах архитектурно-планировочных решений, технико-экономических, санитарно-гигиенических, топливно-энергетических обоснованиях и оценках экономико-географического, социального, производственного, историко-архитектурного и природно-ресурсного потенциала.

При разработке генеральных планов городов:

- учитывают административный статус городов и сельских поселений, прогнозируемую численность населения, экономическую базу, местоположение и роль в системе расселения (агломерации), а также природно-климатические, социально-демографические, национально-бытовые и другие местные особенности;
- исходят из комплексной оценки и зонирования территории города и пригородной зоны, их рационального использования, имеющихся ресурсов (природных, водных, энергетических, трудовых, рекреационных), прогнозов изменения экономической базы, состояния окружающей среды и ее влияния на условия жизни и здоровье населения, социально-

демографической ситуации, включая межгосударственную и межрегиональную миграцию населения;

- предусматривают улучшение экологического и санитарно-гигиенического состояния окружающей среды поселений и прилегающих к ним территорий, сохранение историко-культурного наследия;

- определяют рациональные пути развития поселений с выделением первоочередных (приоритетных) и перспективных социальных, экономических и экологических проблем;

- учитывают перспективы развития рынка недвижимости, возможность освоения территорий через привлечение негосударственных инвестиций и продажу гражданам и юридическим лицам земельных участков, расположенных на территории городских и сельских поселений, или права их аренды т.д.

В том или ином виде все города России имеют генеральные планы. Также Федеральным законом «О стратегическом планировании в Российской Федерации» [136] предусмотрена разработка Стратегии социально-экономического развития муниципальных образований, которая формируется на основе Методических рекомендаций по разработке Стратегии социально-экономического развития муниципальных образований [137]. Методические рекомендации направлены на организацию деятельности, связанной с разработкой на муниципальном уровне Стратегий социально-экономического развития, установлением сбалансированных подходов к реализации в муниципальных образованиях основных направлений социально-экономического развития [122]. Кроме того, в методических рекомендациях определены 10 основных задач развития городов и муниципальных образований и использованы 25 показателей для оценки эффективности реализации Стратегии. В основу комплексной оценки при разработке Стратегии положен метод SWOT-анализа.

Стратегическое планирование связано с разработкой среднесрочных прогнозов (период упреждения от 3 до 6 лет) и основано на использовании индикативного и сценарного методов комплексной оценки, позволяющих по выбранным социально-экономическим показателям (индикаторам) спрогнозировать возможные процессы развития объекта.

Общие перспективы развития поселений, включая принципиальные решения по территориальному развитию, функциональному зонированию, планировочной структуре, инженерно-транспортной инфраструктуре, рациональному использованию природных ресурсов и охране окружающей среды, оценивают на период до 20 лет, а градостроительный прогноз может охватывать 30–40 лет [3].

При комплексной оценке развития городов используют два основных подхода. Первый подход связан с применением экспертных методов (например, SWOT-анализ), основанных на анализе совокупности показателей [138, 139], второй – на использовании статистических методов анализа данных статистического учета. В свою очередь, при планировании социально-экономического развития городов применяют индикативный метод на основе использования агрегированных индексов.

Сегодня при стратегическом планировании развития городов используют методики и методические рекомендации, направленные на унификацию процесса планирования:

- Методические рекомендации к разработке показателей прогнозов социально-экономического развития субъектов Российской Федерации [140];
- Методические рекомендации по заполнению формы (форма 2П) и к разработке показателей прогнозов социально-экономического развития субъектов РФ [138];
- Методические рекомендации по оптимизации стратегического планирования на муниципальном уровне [137];

- Методические рекомендации по согласованной подготовке и реализации документов планирования развития муниципальных образований [122];
- Методические рекомендации по составлению и исполнению бюджетов субъектов Российской Федерации и местных бюджетов на основе государственных (муниципальных) программ [141];
- Методических рекомендаций по разработке долгосрочных планов социально-экономического развития крупных и крупнейших городских агломераций [142];
- Методические рекомендации по разработке краткосрочных прогнозов социально-экономического развития муниципальных образований [143];
- Методические рекомендации по разработке, корректировке, мониторингу среднесрочного прогноза социально-экономического развития Российской Федерации [144];
- Методические рекомендации по разработке и корректировке стратегии социально-экономического развития субъекта Российской Федерации и плана мероприятий по ее реализации [139];
- Методические рекомендации по подготовке проектов схем территориального планирования субъектов Российской Федерации [145];
- Перечень показателей мониторинга процессов в реальном секторе экономики, финансово-банковской и социальной сферах субъектов Российской Федерации [146];
- Методические рекомендации МЧС России по мониторингу и прогнозированию чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера [147].

При использовании перечисленных документов отделами и службами городов и муниципальных образований собирается множество

статистических данных, текущей информации городских систем мониторинга и операционных центров и веб-ресурсов. В совокупности эти источники генерируют «большие данные» настолько огромные, что на практике традиционными методами и существующим программным обеспечением на уровне городских служб их нельзя проанализировать. Анализ данных, мониторинг в реальном времени и автоматизация муниципальных служб чрезвычайно полезны для городского планирования и предоставления услуг. Многие города развивают информационные системы для обработки данных и поддержки принятия решений.

Следующим этапом является необходимость объединить процессы информатизации городов в области экономики, энергетики, связи, транспорта, медицины, образования, оказания услуг и систем управления и планирования в единое целое. Так появились широко распространенные концепции «Цифровой город» и «Умный город», которые направлены на отработку передовых цифровых решений и массовое внедрение информационных технологий в городских сообществах. Однако не всегда прикладные практики этих концептуальных направлений отражают реальные потребности городов и населения.

В этом плане решение задач стратегического планирования процессов развития городов становится все более актуальным, т.к. накопление громадных объемов данных мониторинга и статистической информации закономерно приводит к необходимости применения эффективных методов комплексной оценки, анализа, прогнозирования и управления. При этом следует отметить, что именно в области комплексных измерений и стратегического планирования развития городов имеется ряд нерешенных методических проблем, связанных с недостаточно развитой аналитической и прогностической базой, а также с использованием информационно-аналитических и интеллектуальных технологий и системных моделей.

### **1.5. Выводы и некоторые актуальные задачи комплексной оценки**

В данной главе изучено состояние вопроса в области комплексной оценки, анализа рисков и моделирования урбанизированных территорий и городских агломераций, выполнена их классификация и систематизация, дана характеристика показателей и индикаторов для исследования таких систем. Урбанизированные территории и городские агломерации описаны как объекты наблюдения и статистического учета. Показано, что анализ данных наблюдений и измерений состояний и процессов развития урбанизированных территорий позволяет выявить закономерности в динамике урбанизации, обеспечить изучение городов как сложных градостроительных и социально-экономических систем, а также обеспечить их системное представление в виде объектов стратегического планирования. В главе представлена типовая пространственно-распределенная система города, описаны мировые тенденции в процессах урбанизации, указаны основные проблемы измеримости состояний урбанизированных систем.

Проведенный обзор информации по изучаемой проблеме позволяет сделать следующие выводы.

В настоящее время существует несколько определений и классификаций урбанизированных территорий, городских агломераций, а также природно-антропогенных систем. Говоря о состоянии городских агломераций, природно-антропогенных и урбанизированных систем, обычно подразумевают социально-экономическую, градостроительную и технологическую 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 значений ее показателей, характеризующих

структуру и процессы функционирования систем. Каждый объект в градостроительном, природном, антропогенном и техногенном отношении может характеризоваться множеством показателей, свойственным только данному виду городских агломераций, урбанизированных территорий и 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 урбанизированных территорий. Однако при комплексной оценке для расчета интегральных показателей в определенном аспекте чаще всего используются одновременно не более 5–8 показателей.

Таким образом, сегодня сформулированы основные статистические и измеряемые показатели, характеризующие состояние и развитие городских агломераций, урбанизированных территорий и природно-антропогенных систем, которые используются при комплексной оценке в области градостроительного, социально-экономического, экологического и техногенного развития. 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 (переменные состояния) для оценки развития систем. Существуют только общепринятые перечни показателей для различных урбанизированных территорий, 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, предполагается оптимальным решением вопроса;

- построение моделей урбанизированных территорий и городских агломераций 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 массивам данных.

Следует также отметить, что в связи с большим количеством изучаемых урбанизированных территорий, а также множеством разноплановых показателей, сегодня нет общепринятых представлений о том, как выбирать атрибутивные (наиболее значимые, описывающие состояния объекта) 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 урбанизированных территорий и городских агломераций. Все практически сводится или к множественным пространственным 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 (практически мультиколлинеарной) 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 урбанизированных территорий 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 краевых задач 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 урбанистики, социальных и 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, урбанизированных регионов и стран, используют весь набор традиционных экспертных методов и не позволяют достоверно прогнозировать развитие объектов на среднесрочную и долгосрочную 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, нейросетевых моделей описания данных и машинного обучения.

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 урбанизированных территорий и городских агломераций, отличающихся сложными причинно-следственными связями и спецификой физико-химических и социально-экономических процессов. Как следствие, подобные модели имеют низкую адекватность и слабо идентифицируются по данным.

Наиболее широкое распространение при комплексной оценке и анализе безопасности урбанизированных территорий и городских агломераций 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 урбанизированных территорий и городских агломераций связано с распространением феноменологических методов естественных наук в область социальных и экологических исследований. В литературе имеются реальные примеры разработки многомерных системодинамических моделей антропогенных, технологических, социальных, природных и экологических систем, состояния которых описываются комплексом

различных параметров. Все это указывает на реальность построения теории опасности и риска для урбанизированных территорий и городских агломераций, где наблюдаются процессы социально-экономического, экологического и техногенного развития, а также изменения, связанные с антропогенными воздействиями.

В процессе анализа литературных источников выявлен ряд закономерностей и аспектов современной урбанизации. Крупные регионы стран мира станут более урбанизированными, однако темпы роста городов замедлятся. Города играют ключевую роль в развитии цивилизации и являются первоосновой социального прогресса, поэтому мировой прогресс будет определяться дальнейшим неизбежным объединением агломераций в мегагорода. Производя основную долю экономических и технологических ресурсов, большие города способствуют процветанию национальных экономик, социальному развитию и культурному разнообразию. Они являются интегрированными сетями создания и распространения знаний, что повышает уровень образования населения в целом. Рост производительности труда в городах осуществляется за счет повышения эффективности промышленной и хозяйственной инфраструктуры и синергетических эффектов агломерации от объединения городских образований, расширения границ рынков сбыта продукции, эффективного развития производительных сил.

Процессы урбанизации приводят к стремительному развитию транспортной системы города, систем жилищно-коммунального хозяйства, строительного комплекса, информатизации и связи, а также здравоохранения и образования. На фоне роста доходов горожан всё это способствует созданию более комфортных условий жизни, улучшению возможностей потребления, повышению доступности предоставления высококвалифицированных, своевременных и качественных услуг в системе образования, здравоохранения, росту эффективности

использования ресурсов, что, в свою очередь, способствует повышению качества жизни горожан.

Наряду с позитивными последствиями, урбанизация приводит и к ряду отрицательных аспектов развития, связанных с изменением в образе жизни, загрязнением окружающей среды, жилищными и транспортными проблемами, ростом уровня преступности и т.д. Так, одной из всё более распространяющихся негативных тенденций, имеющей серьезные последствия для экологической устойчивости, является территориальное разрастание городов. Сохранение данного негативного явления приведет к устойчивому росту реальных эксплуатационных расходов на единицу площади для обслуживания городских территорий, а основная часть городской экспансии будет происходить за счет близлежащих природных территорий. К существенным отрицательным последствиям развития урбанизации также относятся увеличение неравенства доходов горожан, рост неконтролируемой международной и внутренней миграции, наличие сопутствующей бедности, преступности и рабочей силы низкого качества, недостижимость доступного жилья, увеличение безработицы среди молодежи и т.п.

Решение проблемы комплексного исследования процессов урбанизации связано с необходимостью применения системного подхода, который бы охватывал накопление и анализ данных наблюдений, измерений и статистического учета, построение моделей развития городов в различных аспектах, интегрированную оценку и прогнозирование процессов взаимосвязанного территориального развития, а также стратегическое планирование и достоверное предсказание последствий плановых решений.

В целом, как показали выполненные исследования, существует определенный перечень актуальных задач системного анализа и

комплексной оценки урбанизированных территорий и городских агломераций. 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 урбанизированных территорий и городских агломераций на основе применения вероятностных методов и использования массивов данных статистической информации;
- разработка системно-феноменологических 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 прогностических целях.

Важными прикладными задачами 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.

## Глава вторая

### ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ПРИРОДНЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ

#### 2.1 Биомониторинг состояния поверхностных вод русла реки Кальмиус с применением методов флуориметрии

**Мониторинговые точки.** Для мониторинга состояния поверхностных вод русла реки Кальмиус была выбрана 21 мониторинговая точка (рис. 2.1). Мониторинговые точки были выбраны таким образом, чтобы обеспечить оценку состояния поверхностных вод как самой реки, так и ее основных притоков. Так же точки располагались в местах попадания сточных вод из потенциальных источников загрязнения. Основными источниками загрязнения русла реки в черте города являются сточные воды шахты им. А.Ф. Засядько и ПАО «Донецкий металлургический завод».

Мониторинговая точка 1 расположена до попадания сточных вод шахты им. А.Ф. Засядько в русло реки Кальмиус – около восточного вентиляционного ствола. Точка 2 расположена после точки попадания шахтных сточных вод в реку; точка 3 – на участке узкого русла реки Кальмиус до попадания в Нижнекальмиусское водохранилище. Мониторинговые точки 4–6 расположены вдоль Нижнекальмиусского водохранилища. Выбор данных точек обусловлен наличием рекреационной зоны для населения, низкой скорости течения и большой площади освещенности, что способствует интенсивному развитию различных видов фитопланктона в течение года. Мониторинговая точка 7 расположена в месте перелива воды из водохранилища в русло реки. Мониторинговая точка 8 расположена после попадания сточных вод ПАО

«Донецкий металлургический завод» в реку. Мониторинговые точки 9 и 10 характеризуют состояние одного из притоков р. Кальмиус – р. Дурная (рис. 2.4). Точка 11 расположена ниже по течению после впадения р. Дурная в р. Кальмиус.

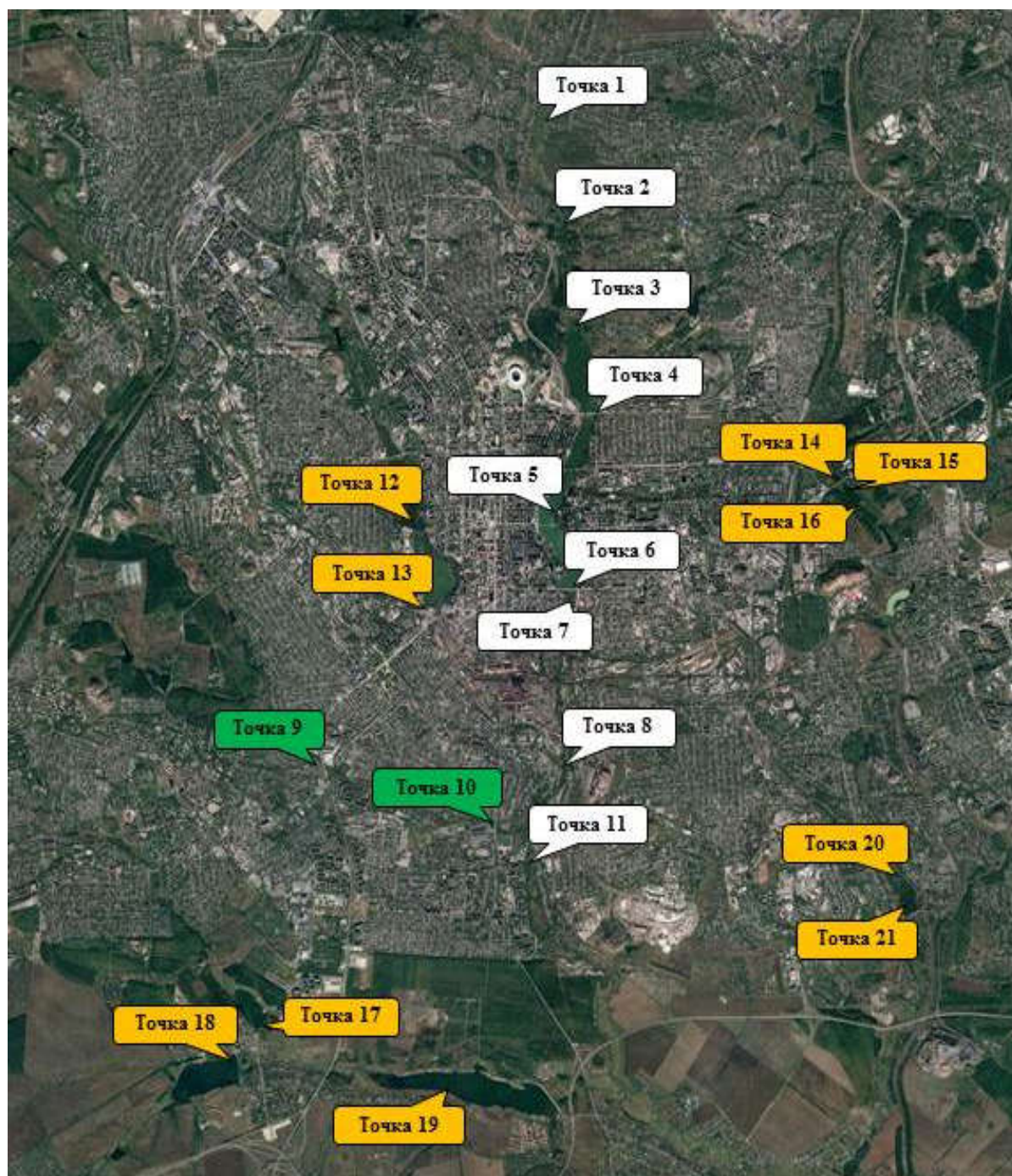


Рисунок 2.1 – Мониторинговые токи русла р. Кальмиус

Так же проводились исследования по оценке состояния водоемов в черте города Донецка, воды которых попадают в русло реки Кальмиус. Были обследованы пруды, расположенные на территории Центрального парка культуры и отдыха им. А.С. Щербакова: точка 12 – II городской пруд, точка 13 – I городской пруд; Донецкого ботанического сада: точка 14 – III пруд, точка 15 – перелив между III прудом и прудом «Молодежный» (рис. 2.5), точка 16 – место перелива пруда «Молодежный»; пруда Песчаный – точка 17; озера Кирша – точка 18 (рис. 2.3); водохранилища Донецкое море – точка 19; пруда Алексеевский: точки 20 и 21 – место притока и перелива воды соответственно (рис. 2.2).

На рисунке 2.1 мониторинговые точки, расположенные непосредственно в области русла реки Кальмиус, выделены белым цветом, реки Дурная – зеленым, основных водоемов – желтым.

Отбор проб производили в утреннее и дневное время в пластиковую тару объемом 2 дм<sup>3</sup>. Во время отбора проб проводили измерения освещенности и температуры воды. Освещенность измеряли с помощью люксметра СТ–1330В, температуру воды определяли с помощью ртутного термометра.

Определение содержания хлорофилла и других фотопигментов осуществлялось согласно ГОСТ 17.1.4.02-90 [148].

При фильтровании клетки фитопланктона осаждали на ацетилцеллюлозные мембранные фильтры типа МФАС–ОС–4 фирмы «Владипор» с диаметром пор 0,6 мкм с помощью насоса Комовского.

Экстрагирование пигментов осуществляли путем растирания фильтров с добавлением нескольких кубических сантиметров 90%-ного ацетона. Для экстрагирования пигментов гомогенат в течение 30 минут выдерживали при комнатной температуре. Полученный экстракт сливали в центрифужную пробирку.

Светорассеивающую взвесь удаляли из экстракта центрифугированием при 4 000 – 5 000 g в течение 15 мин при 8 000 об/мин. Центрифугирование проводили с помощью центрифуги ОПн–8. Чистоту экстракта контролировали по оптической плотности на 750 нм, которая не должна превышать 0,005 Б на каждый сантиметр рабочей длины кюветы. При более высокой плотности центрифугирование повторяли.

После центрифугирования экстракт переносили в стеклянную мерную пробирку, при необходимости добавляя 90%-ный ацетон, доводя объем пробирки до объема фотометрической кюветы.

Спектрофотометрические измерения выполняли с помощью спектрофотометра S 108UV фирмы Ulab. При спектрофотометрировании использовали кюветы с рабочей длиной 1 см.

Отсчеты оптических плотностей осуществляли на четырех длинах волн – 664, 647, 630 и 750 нм. Фотометрирование проводили дважды: до и после подкисления экстракта раствором соляной кислоты в ацетоне. Количество кислоты, добавляемой в экстракт, зависило от его объема и рассчитывалось таким образом, чтобы концентрация кислоты в нем равнялась 3–5 ммоль·дм<sup>-3</sup>.

При фотометрировании подкисленного экстракта отсчеты проводили на двух длинах волн – 664 и 750 нм.

Одновременно с определением концентрации хлорофилла определяли концентрации и других пигментов: феофитина, хлорофиллов, суммарную концентрацию каротиноидов, а также пигментный индекс. С этой целью до подкисления экстракта дополнительно проводились измерения на 430 и 480 нм.

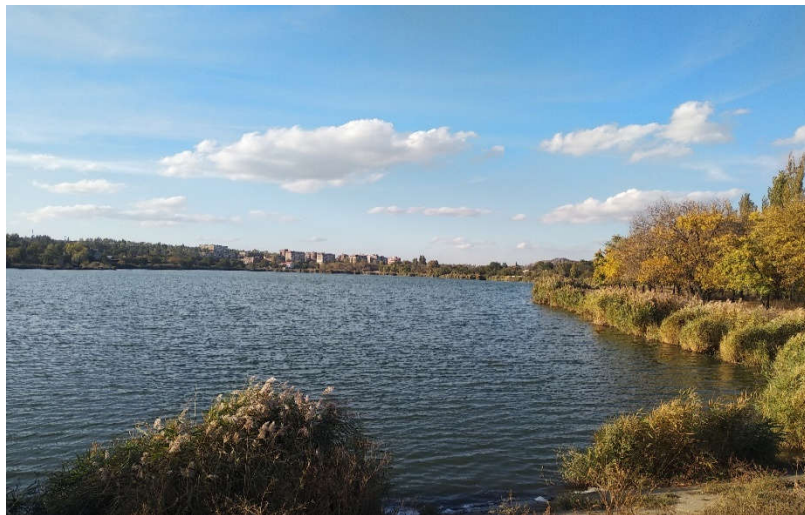


Рисунок 2.2 – Пруд Алексеевский



Рисунок 2.3 – Озеро Кирша



Рисунок 2.4 – Река Дурная



Рисунок 2.5 – Пруд Молодежный

Концентрацию хлорофилла *a* в пробе  $c_{ха}$  вычисляли по формуле:

$$c_{ха} = 2,44 \frac{D_{664} - D_{664}^k}{D_{664}} c'_{ха}, \quad (2.1)$$

где  $D_{664}$  и  $D_{664}^k$  – оптические плотности экстракта в белых на длине волны 664 нм до и после его подкисления.

Концентрации хлорофилла *a* в пробе,  $\text{мкг} \cdot \text{дм}^{-3}$ , без поправки на присутствие феофитина *a* ( $c'_{ха}$ ) вычисляли как:

$$c'_{ха} = (11,85 \cdot D_{664} - 1,54 \cdot D_{647} - 0,08 \cdot D_{630}) \frac{V_э}{V_{пр} l}, \quad (2.2)$$

где  $D_{630}$  и  $D_{647}$  – оптические плотности экстракта в белых на длинах волн 630 и 647 нм;  $V_э$  – объем экстракта,  $\text{см}^3$ ;  $V_{пр}$  – объем пробы,  $\text{дм}^3$ ;  $l$  – длина кюветы, см.

Концентрации других пигментов  $c_{фа}$ ,  $c_b$ ,  $c_{c_1+c_2}$ ,  $c_k$ ,  $\text{мкг} \cdot \text{дм}^{-3}$ , рассчитывали по формулам:

$$c_{фа} = 2,44 \frac{1,7 \cdot D_{664}^k - D_{664}}{D_{664}} c'_{ха}, \quad (2.3)$$

$$c_b = (21,03 \cdot D_{647} - 5,43 \cdot D_{664} - 2,66 \cdot D_{630}) \frac{V_э}{V_{пр} l}, \quad (2.4)$$

$$c_{c_1+c_2} = (24,52 \cdot D_{630} - 1,67 \cdot D_{664} - 7,6 \cdot D_{647}) \frac{V_э}{V_{пр} l}. \quad (2.5)$$

В том случае, если в пробе содержались преимущественно зеленые или сине-зеленые водоросли, то концентрации каротиноидов  $c_k$ ,  $\text{мкг} \cdot \text{дм}^{-3}$ , вычисляли по формуле:

$$c_k = 4D_{480} \frac{V_э}{V_{пр} l}. \quad (2.6)$$

При доминировании диатомовых, перидиней, золотистых и разножгутиковых концентрации каротиноидов определяли согласно формуле:

$$c_k = 10D_{480} \frac{V_э}{V_{пр} l}. \quad (2.7)$$

Пигментный индекс в экстракте вычисляли следующим образом:

$$\frac{I_{430}}{664} = \frac{D_{430}}{D_{664}}. \quad (2.8)$$

Все оптические плотности брали с учетом поправки, которая равна оптической плотности на длине волны 750 нм. Эта поправка вычитается из значения измеренной оптической плотности. За результат определений принимают единичный результат для каждой пробы.

Флуориметрический анализ проб воды проводился с помощью флуориметров Phyto-PAM (Walz, Германия) и ФС-2 (СКТБ «Турбулентность» ДонНУ). В ходе исследования проводили измерение общего содержания хлорофилла по сигналу флуоресценции на длине волн 470, 520, 645 и 685 нм, а также следующих показателей флуоресценции:

$F_0$  – минимальный уровень флуоресценции, соответствующий состоянию, когда все реакционные центры (РЦ) фотосистемы II (ФС II) открыты;

$F_m$  – максимальный уровень флуоресценции, соответствующий состоянию, когда все РЦ ФС II закрыты;

$F_v = F_m - F_0$  – переменная или вариабельная флуоресценция, отражает соотношение между константами скоростей реакций фотохимического и не фотохимического использования энергии возбуждения реакционного центра;

$\Phi_0 = \frac{F_m - F_0}{F_m}$  – квантовый выход флуоресценции, показатель эффективности протекания первичной фотохимической реакции в ФС II [149–151].

Кроме того, выполняли регистрацию световых кривых флуоресценции хлорофилла.

Также с помощью флуориметра ФС-2 получали кривые индукции флуоресценции хлорофилла. На основе полученных кривых и параметров

ОЛР-теста [149, 150, 152–154] проводили анализ состояния микроводорослей.

По индукционным кривым определяли следующие параметры:

$T_{F_m}$  – время, необходимое для достижения максимального уровня флуоресценции (миллисекунды);

$A_0$  или Area – площадь над индукционной кривой;

$S_m = \frac{A_0}{F_m - F_0}$  – нормированную общую площадь над кривой ОЛР (отражает емкость пула электронных акцепторов до полного восстановления  $Q_a$ );

$M_0$  – скорость закрывания реакционных центров ФС II,  $\text{мс}^{-1}$ ;

$V_t = \frac{F_t - F_0}{F_m - F_0}$  – относительную величину переменной флуоресценции в момент времени  $t$ ;

$V_J = \frac{F_J - F_0}{F_m - F_0}$  – относительную величину переменной флуоресценции в фазе J после 2 мс освещения (отражает количество закрытых РЦ по отношению к общему числу РЦ, которые могут быть закрыты);

$V_I = \frac{F_I - F_0}{F_m - F_0}$  – относительную величину переменной флуоресценции во время фазы I (30 мс), связанную с промежуточным стационарным уровнем восстановления пула пластохинонов (отражает способность ФС I и ее акцепторов окислять  $\text{PQH}_2$ );

$\Phi_{E_0}$  – квантовую эффективность переноса электронов от  $Q_a^-$ ;

$\Psi_0 = 1 - V_J$  – вероятность транспорта электронов за пределы  $Q_a^-$  (при  $t=0$ ), то есть эффективность, с которой экситон, захваченный РЦ, движет электрон по цепочке после  $Q_a^-$ ;

*PI* – тотальный индекс производительности – показатель функциональной активности ФС II, ФС I и цепи переноса электронов между ними [150, 152–155].

Достоверность отличий средних значений, полученных данных определяли с использованием критерия Вилкоксона [156].

Все исследования выполнялись в осенний период. Пробы воды отбирали в первой половине дня при освещенности 30–50 тыс. Лк. Температура проб воды составляла от 14 °С до 18 °С. Измерения уровня освещенности и температуры проб осуществляли непосредственно в момент отбора проб. При транспортировке проб избегали попадания прямых солнечных лучей на емкости с водой. Перед проведением флуориметрических измерений пробы воды помещали в затемненное место не менее чем на 30 минут для темновой адаптации. Непосредственно перед выполнением измерений пробы взбалтывали, чтобы избежать оседания клеток фитопланктона после темновой адаптации.

Для выполнения единичного измерения на флуориметрах ФС-2 и Phyto-PAM отбирали по 3 мл воды. В ходе исследований выполняли не менее 5 повторов для каждого измерения, в случае высокой степени разброса результатов число повторений увеличивали.

### **2.1.1 Оценка содержания фотосинтетических пигментов в исследуемых мониторинговых точках**

В отечественных работах часто используются такие пигментные характеристики фитопланктона, как концентрации хлорофиллов *a*, *b* и *c*, феопигментов и каротиноидов, пигментные индексы [157–161]. Колебания значений этих пигментных показателей принято объяснять соответствующими изменениями в составе, обилии или

«физиологическом» состоянии фитопланктона. Так, вариабельность концентраций хлорофиллов *b* и *c* и их соотношение с концентрацией хлорофилла *a* (Хлорофилл *a*/Хлорофилл *b*) связывают, как правило, с изменениями в составе и обилии водорослей, содержащих данные пигменты [157–160]. Значения пигментных индексов (E480/E664, E430/E664) и доля феопигментов от суммы с «чистым» хлорофиллом *a* используются как показатели «физиологического» состояния водорослей [157]. При этом подчеркивается, что изменение пигментных индексов и содержания феопигментов соответствует степени развития фитопланктона: при высоком обилии водорослей значения пигментных индексов и относительное содержание феопигментов снижаются за счёт присутствия в фитопланктоне жизнеспособных активных клеток [157–161]. Однако непосредственная статистическая связь данных пигментных показателей со структурными характеристиками фитопланктона практически не рассматривается.

Отношения оптических плотностей экстрактов, косвенно отражающие соотношения концентраций пигментов, могут служить показателями физиологического состояния, структуры и разнообразия фитопланктонного сообщества.

Индекс E480/E664 и индекс Маргалефа (E430/E664) характеризуют соотношение общих каротиноидов и хлорофилла *a*. Считается, что повышение этих индексов свидетельствует об ухудшении «физиологического» состояния фитопланктона и увеличении его пигментного разнообразия [157].

Флуориметрический метод также позволяет определять содержание хлорофилла в исследуемых объектах (частях растений, пробах воды и т.д.) [151, 152, 155]. Однако особенности метода не позволяют точно определить основные виды фотопигментов. Например, флуориметры фирмы Walz, предназначенные для работы с пробами воды, позволяют

разделить фитопланктон на три условные группы: клетки с преимущественным содержанием хлорофилла *a* («Green»), хлорофилла *b* («Brown») и клетки цианобактерий («Blue»). Разделение осуществляется на основании разности длин волн пиков поглощения и испускания данных фотосинтетических пигментов. Поскольку первые две группы могут включать большое число видов микроводорослей, то такое разделение носит условный характер. Кроме того, за счет перекрывания сигналов для первых двух групп возможно неправильное их определение, в частности, при условии, что клеток одной группы значительно больше, чем другой.

Существует достаточное количество данных о положительной корреляции между общим содержанием хлорофилла, определенным флуориметрическим методом, и таковым, при использовании спектрофотометрии [151]. При этом отмечается, что такой результат наблюдается не всегда, что может быть вызвано различными факторами (калибровка, низкие концентрации фотопигментов, мутность проб и т.д.) [151, 155].

Таким образом, возникает необходимость дополнительных исследований в данной области.

На рисунке 2.6 приведены результаты измерений содержания хлорофилла в пробах воды по флуоресценции. Наибольший показатель суммарного содержания фотопигментов был получен в мониторинговой точке Нижнекальмиусского водохранилища – около 8 мкг/л. При этом в мониторинговых точках, расположенных до водохранилища, а также в его начальных точках, суммарное содержание хлорофилла не превышало 1,5 мкг/л. Значительное нарастание концентрации фотопигмента связано с благоприятными для развития фитопланктона условиями – низкая скорость течения, большая площадь освещенности, а также благоприятный температурный фон. При таких условиях в течение года возникает несколько всплесков интенсивного размножения фитопланктона и

последующего «цветения» воды с образованием скоплений клеточной биомассы у поверхности воды (рис. 2.7). Однако, кроме указанных факторов, возможно влияние изменений химического состава воды.

При переходе из водохранилища в узкое русло (точка 7) регистрировали более низкие показатели содержания хлорофилла, что объясняется сливом воды через дамбу не с поверхности, а с некоторой глубины. Поскольку основная биомасса фитопланктона сосредоточена в поверхностном слое воды водохранилища, большая часть клеток не попадает в русло реки.

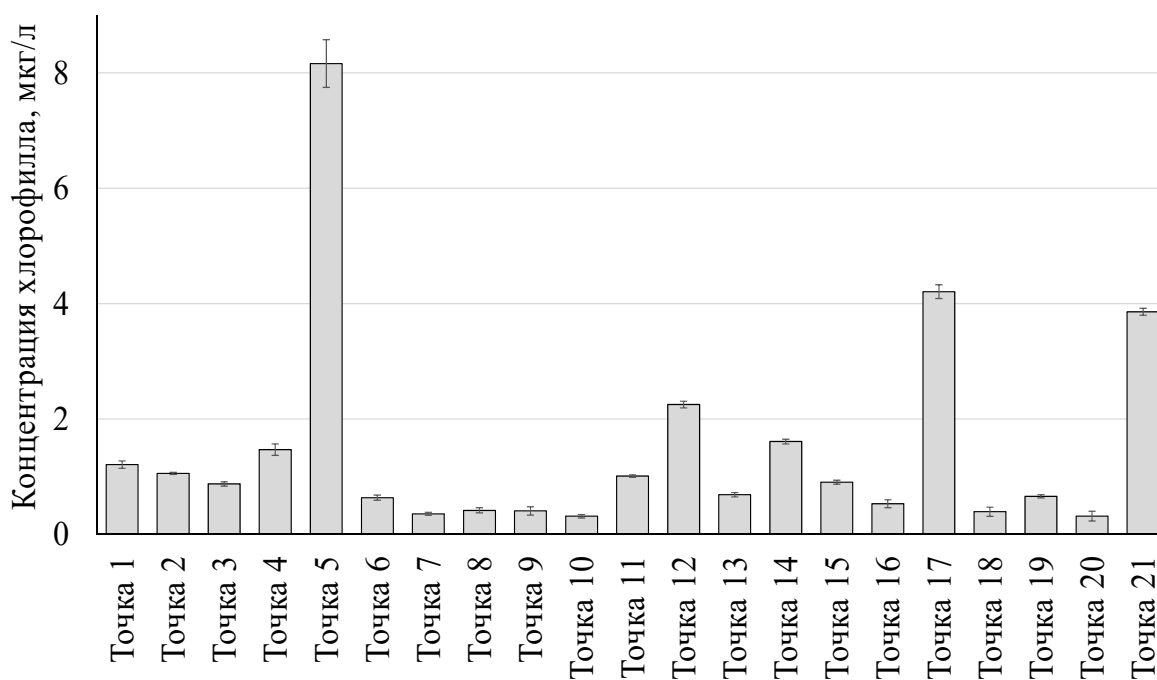


Рисунок 2.6 – Суммарное содержание хлорофилла в мониторинговых точках, полученное флуориметрическим методом

Стоит отметить, что на участке русла от мониторинговой точки 7 до места впадения реки Дурная содержание хлорофилла не изменялось. Никаких изменений в значениях регистрируемого параметра не наблюдалось и на участке русла реки, проходящего около ПАО «Донецкий металлургический завод» (рис. 2.6)

В основном притоке реки Кальмиус в черте г. Донецка – реке Дурная концентрация хлорофилла была близка к значениям в мониторинговых точках 7 и 8. После слияния данных рек суммарное содержание хлорофилла возрастало до 1 мкг/л, что приблизительно равно суммарному содержанию фотопигментов в данных реках до их слияния.



Рисунок 2.7 – Интенсивное развитие фитопланктона  
в мониторинговой точке 5

Содержание суммарного хлорофилла в исследуемых водоемах было различным. Так, в прудах около Донецкого ботанического сада (Точки 14–16) содержание хлорофилла колебалось от 1,5 до 0,5 мкг/л. Стоит отметить высокие концентрации фотопигментов в пруду Алексеевский (точка 21), Песчаный (точка 17) и II пруду в парке им. А.С. Щербакова (точка 12). При этом суммарное содержание хлорофилла в пруду Алексеевский возрастало

в 10 раз в сравнении с начальным притоком (точка 20). Тогда как содержание хлорофилла в точках 13, 18 и 19 (I пруд в парке им. А.С. Щербакова, озеро Кирша и водохранилище Донецкое море соответственно) не превышало 0,7 мкг/л (рис. 2.6).

Кроме общего содержания хлорофилла в пробах воды было определено распределение по трем основным группам пигментов (хлорофиллы *a* и *b*, а также пигменты цианобактерий). Также была произведена оценка вклада каждой из групп в суммарные содержания хлорофилла, для чего были определены отношения концентраций хлорофилла *a*, хлорофилла *b*, хлорофиллов *a+b* и бактериохлорофилла к суммарной концентрации хлорофилла в пробе воды. Все результаты представлены в таблице 2.1 для отдельных мониторинговых точек (в таблице приведены средние значения без указания стандартной ошибки среднего и доверительных интервалов).

В мониторинговых точках с наибольшим суммарным содержанием хлорофилла регистрировали присутствие значительного количества сине-зелёных водорослей, кроме мониторинговой точки 17 (пруд Песчаный). В мониторинговых точках 5 и 21 цианобактерии доминировали над другими представителями фитопланктонного сообщества: содержание хлорофилла *a* и *b* составляло не более 40% от общего содержания фотопигментов. Это может свидетельствовать о высокой степени эвтрофикации данных водоемов и участков русла реки Кальмиус. Также следует отметить, что данные мониторинговые точки являются приоритетными объектами исследований при биотестировании проб воды.

Наибольшее содержание хлорофилла *a* также наблюдали в мониторинговых точках 5 и 17 – не менее 3 мкг/л. Для данных мониторинговых точек не было зафиксировано сигнала флуоресценции для группы фитопланктона, содержащей преимущественно хлорофилл *b*. Также высокое содержание хлорофилла *a*, в сравнении с остальными

результатами измерений, было выявлено в точках 12, 14 и 21 – от 1 до 1,5 мкг/л. В четырех мониторинговых точках сигнала флуоресценции для данной группы фитопланктона обнаружено не было: точки 9, 10, 19 и 20, для которых было характерно преимущественное содержание хлорофилла *b*, т.е. доминирование диатомовых водорослей. Доля данного хлорофилла относительно общего содержания фотопигментов для этих мониторинговых точек составляла 100%.

Содержание хлорофилла *a* колебалось в пределах от 0,5 до 1 мкг/л для 6 мониторинговых точек: шахта им. А.Ф. Засядько (точка 1), мониторинговые точки до Нижнекальмиусского водохранилища (точки 2 и 3), Нижнекальмиусское водохранилище (точка 4), точка после слияния рек Кальмиус и Дурная (точка 11) и пруд Молодежный (точка 15). Более низкие значения – от 0,1 до 0,5 мкг/л – наблюдали в 6 мониторинговых точках: точки у перелива Нижнекальмиусского водохранилища в узкое русло реки (точки 6 и 7), около ПАО «Донецкий металлургический завод» (точка 8), а также для I пруда в парке им. А.С. Щербакова, пруда Молодежный и озера Кирша (точки 13, 16 и 18 соответственно).

Наибольшее содержание хлорофилла *b* было зарегистрировано для пруда Песчаный (точка 17) – около 1 мкг/л. Концентрации данного пигмента в диапазоне от 0,45 до 0,7 мкг/л были получены для мониторинговых точек 1, 9, 12, 14, 17 и 19, тогда как в 13 мониторинговых точках происходили колебания содержания хлорофилла *b* в пределах от 0,1 до 0,45 мкг/л – точки 2–4, 6–8, 10, 11, 13, 15, 16, 18 и 20.

В 16 мониторинговых точках (все точки кроме 5, 12–14 и 21) основную долю фотопигментов занимали хлорофиллы *a* и *b*. При этом, как правило, в данных точках преобладали клетки фитопланктона, содержащие хлорофилла *a* как основной пигмент. Только для мониторинговых точек 7 и 18 соотношение пигментов группы *a* и *b* было примерно равным.

Таблица 2.1 – Содержание фотосинтетических пигментов в мониторинговых точках согласно методу флуориметрии

Группы фотосинтетических пигментов Мониторинговые точки	Содержание пигментов цианобактерий (645 нм), мкг/л	Содержание хлорофилла <i>a</i> (470 нм), мкг/л	Содержание хлорофилла <i>b</i> (520 нм), мкг/л	Общее содержание хлорофилла, мкг/л	Пигм. при 645 нм/Общ. хл-л	Хл-л <i>a</i> /Общ. хл-л	Хл-л <i>b</i> /Общ. хл-л	Хл-л ( <i>a</i> + <i>b</i> )/Пигм. при 645 нм
Точка 1. Засядько	0,00	0,71	0,50	1,21	0,00	0,59	0,41	1,00
Точка 2. Томская	0,00	0,71	0,35	1,06	0,00	0,67	0,33	1,00
Точка 3. До НКВ	0,00	0,56	0,31	0,88	0,00	0,64	0,36	1,00
Точка 4. Мира НКВ	0,00	0,99	0,31	1,30	0,00	0,76	0,24	1,00
Точка 5. Ильича	5,10	3,07	0,00	8,16	0,62	0,38	0,00	0,38
Точка 6. Дзержинского (до слива)	0,00	0,44	0,20	0,64	0,00	0,69	0,31	1,00
Точка 7. Дзержинского (после слива)	0,00	0,19	0,17	0,36	0,00	0,53	0,47	1,00
Точка 8. Клиническая	0,00	0,17	0,25	0,42	0,00	0,40	0,60	1,00

Продолжение таблицы 2.1

Точка 9. Дурная (Ленинский)	0,00	0,00	0,41	0,41	0,00	0,00	1,00	1,00
Точка 10. Дурная (Ткаченка)	0,00	0,00	0,32	0,32	0,00	0,00	1,00	1,00
Точка 11. Куприна	0,00	0,67	0,34	1,01	0,00	0,66	0,34	1,00
Точка 12. Щербакова II пруд	0,40	1,28	0,57	2,25	0,18	0,57	0,25	0,82
Точка 13. Щербакова I пруд (Стадионная)	0,14	0,40	0,14	0,69	0,20	0,59	0,21	0,80
Точка 14. III пруд Бот. сад	0,13	1,00	0,47	1,61	0,08	0,62	0,29	0,92
Точка 15. Молодежный (до слива)	0,00	0,64	0,26	0,91	0,00	0,71	0,29	1,00
Точка 16. Молодежный (после слива)	0,00	0,33	0,21	0,53	0,00	0,61	0,39	1,00
Точка 17. Песчаный	0,00	3,13	1,08	4,21	0,00	0,74	0,26	1,00
Точка 18. Кирша	0,00	0,18	0,22	0,39	0,00	0,45	0,55	1,00
Точка 19. Донецкое море	0,00	0,00	0,66	0,66	0,00	0,00	1,00	1,00
Точка 20. Алексеевский (до слива)	0,00	0,00	0,32	0,32	0,00	0,00	1,00	1,00
Точка 21. Алексеевский (после слива)	2,46	1,40	0,00	3,86	0,64	0,36	0,00	0,36

Таким образом, мониторинговые точки 5, 6, 9, 13 и 21 являются приоритетными объектами исследований при биотестировании токсичности проб воды, поскольку было получено нехарактерное для большинства точек распределение фотосинтетических пигментов, а также значительно отличающиеся их концентрации.

Определение содержания фотосинтетических пигментов с помощью спектрофотометрического метода является трудоемким и занимает много времени. В связи с этим были выбраны наиболее характерные для отдельных участков мониторинга точки, для которых и определялись концентрации пигментов данным методом. К таким участкам мониторинговых исследований можно отнести участок русла р. Кальмиус до Нижнекальмиусского водохранилища (точки 1–3), Нижнекальмиусское водохранилище (точки 4–6), участок русла после водохранилища (точки 7 и 8), р. Дурная (точки 9 и 10), участок русла р. Кальмиус после впадения р. Дурная (точка 11), пруды на территории парка им. А.С. Щербакова (точки 12 и 13), пруды около Донецкого ботанического сада (точки 14–16), пруд Алексеевский (точки 20 и 21), а также водоемы юго-западной части города – пруд Песчаный, озеро Кирша и водохранилище Донецкое море (точки 17–19).

Таким образом, спектрофотометрическое определение содержания фотосинтетических пигментов было выполнено для проб воды в следующих мониторинговых точках: шахта им. А.Ф. Засядько (точка 1), как начальная точка мониторинговых исследований; Нижнекальмиусское водохранилище (точки 5 и 6), как точки, в которых наблюдали наибольший сезонный рост количества клеток фитопланктона; р. Дурная (точка 9), как основной приток; слияние рек Дурная и Кальмиус, ул. Куприна (точка 11); I пруд в парке им. А.С. Щербакова (точка 13); пруды Молодежный и Алексеевский (точки 16 и 21 соответственно); водохранилище Донецкое

море (точка 19), как наиболее значимый и большой водоем на данном мониторинговом участке.

Для проведения спектрофотометрии отфильтровывали около 400–500 мл воды из указанных проб в соответствии с методическими указаниями ГОСТ 17.1.4.02-90 [148].

Результаты исследований приведены в таблице 2.2.

Наибольшее содержание хлорофилла *a* было зарегистрировано в мониторинговой точке 21 (пруд Алексеевский) – около 830 мкг/л, что примерно в 2 раза больше, чем в точках 1, 11 и 13. Более низкие концентрации были определены для мониторинговых точек пруд Молодежный, Донецкое море и пр. Ильича – 107, 132 и 188 мкг/л соответственно. Для мониторинговых точек 6 и 9 содержание данного пигмента было на границе обнаружения (табл. 2.2). В общем, для большинства мониторинговых точек содержание хлорофилла *a* было значительно выше, чем концентрации других пигментов. Некоторые исследователи отмечают, что на определение содержания хлорофилла *a* значительное влияние могут оказывать продукты распада хлорофилла (феопигменты), недоучет которых приводит к завышению концентраций хлорофилла *a* и, соответственно, к ошибкам при расчете показателя хлорофилл *b* [152, 153]. В связи с этим были вычислены концентрации хлорофилла *a* с поправкой на содержание феофитина в исследуемых экстрактах (табл. 2.2).

Концентрации хлорофиллов *b* и *c* были значительно ниже, чем хлорофилла *a*. Наибольшая концентрация была получена для пробы из точки 1 – 31 мкг/л. Более низкие значения определены в мониторинговых точках 11 и 21 – 17 и 12 мкг/л соответственно. Для остальных точек были характерны концентрации менее 5 мкг/л. Содержание хлорофилла *c* было наибольшим в пробе воды точки 11 – 47 мкг/л.

Таблица 2.2 – Содержание фотосинтетических пигментов в отдельных мониторинговых точках

Мониторинговая точка Определяемый параметр (спектрофотометрия)	Точка 1 – Засядько	Точка 6 – пр. Дзержинского	Точка 16 – пруд Молодежный	Точка 21 – пруд Алексеевский	Точка 19 – Донецкое море	Точка 5 – пр. Ильича	Точка 11 – ул. Куприна	Точка 9 – река Дурная	Точка 13 – I-й пруд, парк им. А.С. Щербакова
Хлорофилл <i>a</i> , мкг·дм <sup>-3</sup>	398,30	10,3	107,1	830,2	131,9	187,9	378,9	-14,01	302,2
Хлорофилл <i>a</i> (без погр. на феофитин), мкг·дм <sup>-3</sup>	322,29	59,0	114,8	874,9	162,2	206,9	447,0	40,19	324,2
Феофитин <i>a</i> , мкг·дм <sup>-3</sup>	-126,64	83,3	14,00	83,02	52,75	34,05	119,2	92,45	40,00
Хлорофилл <i>b</i> , мкг·дм <sup>-3</sup>	30,88	0,04	2,09	12,26	7,86	-12,99	16,61	4,03	4,15
Хлорофилл <i>c</i> ( <i>c</i> <sub>1</sub> + <i>c</i> <sub>2</sub> ), мкг·дм <sup>-3</sup>	33,54	7,32	11,53	37,00	26,30	12,60	47,45	15,59	38,29
Каротиноиды (зел./цианобакт.), мкг·дм <sup>-3</sup>	133,20	29,6	71,20	390,4	75,17	100,6	206,7	26,49	138,2
Каротиноиды (диатомеи), мкг·дм <sup>-3</sup>	333,00	74,0	178,0	976,0	187,9	251,4	516,7	66,21	345,6
Пигм. индекс (Инд. Маргалефа), отн. ед.	2,25	2,71	2,65	2,05	2,61	2,08	2,36	3,64	2,38
Пигм. индекс 480/664, отн. ед.	1,17	1,43	1,76	1,27	1,31	1,39	1,31	1,86	1,21
Объем фильтрата, мл	555	555	445	400	400	400	500	400	500

Также значительные концентрации данного пигмента были получены для мониторинговых точек 1, 13, 19 и 21 – 34, 38, 26 и 37 мкг/л соответственно. Более низкие значения были характерны для мониторинговых точек 5, 9 и 16 – 13, 16 и 12 мкг/л соответственно. Наименьшая концентрация хлорофилла *c* была характерна для мониторинговой точки 6 – около 7 мкг/л (табл. 2.2).

Наибольшие концентрации каротиноидов наблюдали в мониторинговой точке 21, также сравнительно высокое содержание дополнительных пигментов наблюдали для точек 1 и 11. Наименьшие концентрации каротиноидов были характерны для точек 6 и 9.

Из-за разнообразия состава и спектральных свойств каротиноидов фитопланктона надежные методы их количественного определения в общем экстракте отсутствуют. Для определения вклада этих пигментов в поглощение света водорослями используют отношение  $D_{430}/D_{663}$  – пигментный индекс Маргалефа [157–160], отношение оптической плотности экстракта в синей и красной областях спектра [157]. При 663–664 нм свет поглощается только хлорофиллом, при 430–480 нм – преимущественно каротиноидами [158, 160]. В экологических исследованиях соотношение желтых и зеленых пигментов служит показателем состояния фитопланктонного сообщества. Существует мнение, что относительное увеличение каротиноидов указывает на дефицит азота в клетках водорослей, действия на них избыточного освещения или самозатенения, пресс растительного зоопланктона [157].

Наибольшее значение индекса Маргалефа наблюдали для русла реки Дурная. Данный показатель для остальных мониторинговых точек колебался в равных пределах – от 2,1 до 2,7. Согласно литературным данным [157–161] полученные значения пигментного индекса свидетельствуют о некотором нарушении «физиологического

благополучия» клеток фитопланктона, что, возможно, связано с интенсивной антропогенной нагрузкой на исследуемые водные объекты.

Значения пигментного индекса 480/664 изменялись в малых пределах для всех мониторинговых точек – от 1,1 до 1,9, что, согласно литературным данным [157, 158], не указывает на какие-либо нарушения в функционировании клеток фитопланктона.

Для определения взаимосвязи между результатами по определению концентраций фотосинтетических пигментов с помощью флуориметрического и спектрофотометрического методов вычисляли коэффициент корреляции. Результаты приведены в таблице 2.3.

Значения коэффициента корреляции были вычислены по заданным критериям для девяти мониторинговых точек. В таблице 2.3 серым цветом выделены значения со средним уровнем корреляции и темно-серым – для высокого уровня.

Средний уровень корреляции был получен между концентрациями хлорофилла *b* для результатов исследуемых методов ( $r = 0,54$ ). Поскольку для большинства проб наблюдали преобладание хлорофиллов типов *a* и *b* (табл. 2.1 и 2.2), то достаточный уровень связи для двух методов ожидали получить и для концентраций хлорофилла *a*. Однако, как для концентраций пигмента (с поправкой на содержание феофитина и без нее), так и для доли данного пигмента относительно общего содержания фотопигментов в пробах, были получены низкие значения коэффициента корреляции.

Для концентрации феофитина не наблюдали явной корреляционной связи с флуориметрическими показателями, что, прежде всего, объясняется отсутствием явного флуоресценцного отклика для данного фотопигмента. Также была выявлена достаточная положительная корреляция между содержанием каротиноидов и долей фотопигментов цианобактерий и хлорофилла *b*.

Таблица 2.3 – Значения коэффициента корреляции между результатами определения концентраций фотопигментов методами спектрофотометрии и флуориметрии

<div>Содержание фотопигментов (флуориметрия)</div> <div>Определяемый параметр (спектрофотометрия)</div>	Содержание пигментов цианобактерий (645 нм), мкг/л	Содержание хлорофилла <i>a</i> (470 нм), мкг/л	Содержание хлорофилла <i>b</i> (520 нм), мкг/л	Общее содержание хлорофилла, мкг/л	Пигм. при 645 нм / Общ. хл-л	Хл-л <i>a</i> / Общ. хл-л	Хл-л <i>b</i> / Общ. хл-л	Хл-л ( <i>a</i> + <i>b</i> ) / Пигм. при 645 нм
Хлорофилл <i>a</i> , мкг·дм <sup>-3</sup>	0,28	0,31	-0,30	0,28	0,58	0,18	-0,56	0,17
Хлорофилл <i>a</i> (без погр. на феофитин), мкг·дм <sup>-3</sup>	0,29	0,30	-0,35	0,28	0,60	0,14	-0,55	0,17
Феофитин <i>a</i> , мкг·дм <sup>-3</sup>	0,05	-0,07	-0,29	-0,02	0,12	-0,21	0,07	0,00
Хлорофилл <i>b</i> , мкг·дм <sup>-3</sup>	-0,53	-0,41	0,54	-0,47	-0,37	0,17	0,15	-0,17
Хлорофилл <i>c</i> ( <i>c</i> <sub>1</sub> + <i>c</i> <sub>2</sub> ), мкг·дм <sup>-3</sup>	-0,18	-0,10	0,16	-0,14	0,06	0,16	-0,16	0,33
Каротиноиды (зел./цианобакт.), мкг·дм <sup>-3</sup>	0,30	0,31	-0,37	0,29	0,61	0,14	-0,55	0,14
Каротиноиды (диатомеи), мкг·дм <sup>-3</sup>	0,30	0,31	-0,37	0,29	0,61	0,14	-0,55	0,14
Пигм. индекс (Инд. Маргалефа), отн. ед.	-0,51	-0,62	0,31	-0,55	-0,58	-0,48	0,78	-0,22
Пигм. индекс 480/664, отн. ед.	-0,14	-0,25	-0,07	-0,20	-0,28	-0,32	0,44	-0,36

Следует отметить средний и высокий уровень обратной корреляции между пигментным индексом Маргалефа и общим содержанием хлорофилла в пробах, а также с содержанием отдельных пигментов (табл. 2.3). Также наблюдалась сильная положительная корреляционная связь между долей хлорофилла *b* и данным пигментным индексом ( $r = 0,78$ ). При этом достаточных корреляционных связей между пигментным индексом 480/664 и показателями флуоресценции выявлено не было.

В литературе нет определенных данных, описывающих взаимосвязи различных пигментных индексов и флуоресценции фотосинтетических пигментов. Полученная корреляционная зависимость между индексом Маргалефа и отдельными параметрами флуоресценции может в дальнейшем служить в качестве дополнительных показателей «физиологического» состояния клеток фитопланктона. Однако, необходимо проведение дополнительных исследований для установления подобных корреляционных зависимостей в различные сезонные периоды размножения отдельных групп фитопланктона, а также в моменты их интенсивного разрастания.

### **2.1.2 Регистрация световых кривых флуоресценции хлорофилла**

Световые кривые дают информацию о состоянии световой адаптации и фотосинтетической способности образца. С увеличением плотности квантового потока уменьшается эффективный квантовый выход ФС II, поскольку реакционные центры последовательно закрываются и все большее количество энергии рассеивается в виде тепла.

Световая кривая отражает зависимость эффективного квантового выхода (выход) и относительной скорости переноса электронов (ETR) от интенсивности падающего фотосинтетически активного излучения (PAR).

Шкала PAR автоматически подгоняется к выбранному диапазону интенсивностей света.

Зависимости отображают либо по каналам (выход и ETR, измеренные 4 разными возбуждающими длинами волн), либо по группам водорослей (выход и ETR трех разных типов фитопланктона, полученные с помощью деконволюции с использованием эталонных спектров для голубых, зеленых и коричневых водорослей).

Если известно, что образец не содержит определенного типа фитопланктона, соответствующий отклик инактивировали.

Запись световой кривой происходила по протоколу. Первое измерение производилось в отсутствии актиничного освещения при заданной частоте измерительного света. В то время как в зеленых водорослях, как и в зеленых листьях, максимальный квантовый выход ФС II наблюдается после адаптации к темноте (или к низкой частоте измерительного света), это не справедливо для других типов фитопланктона. В частности, в цианобактериях темновая адаптация вызывает состояние низкого возбуждения ФС II и низкого квантового выхода.

В этом случае, максимальный квантовый выход ФС II индуцируется при умеренных интенсивностях света (прибл. 20–40 мкмоль квант/(м<sup>2</sup>с), что соответствует частотам измерительного света от 32 до 64), предположительно посредством переноса пигмента.

Несмотря на схожесть световых кривых с обычными кривыми световой реакции, существуют так же и некоторые фундаментальные различия, о которых нужно помнить при анализе световых кривых. В частности, время освещения при каждом значении PAR обычно гораздо короче для световых кривых, чем для кривых P-I. Значения в 20 сек заданного по умолчанию, не достаточно для достижения состояния светового равновесия в образце. Таким образом, такие быстрые световые

кривые (Rapid Light Curves – RLC) отражают состояние моментальной световой адаптации образца. Для одного и того же образца имеется столько различных кривых RLC, сколько и разных состояний адаптации к свету. С повышением количества записей RLC максимальная скорость электронного транспорта будет повышаться (пока не начнется фотоингибирование). С другой стороны, должна быть только одна кривая Р-І для заданного образца, если время освещения достаточно велико для того, чтобы обеспечить полную световую адаптацию при каждой засветке.

Процедура подгонки световой кривой с помощью теоретической функции светового отклика производилась согласно измененной версии модели фотосинтеза Эйлера и Питерса [151, 162–167]:

$$ETR = \frac{PAR}{\alpha \cdot PAR^2 + b \cdot PAR + c}. \quad (2.9)$$

Коэффициенты а, b и с подбирались методом наименьших квадратов. Начальная версия модели была изменена для того, чтобы учесть тот факт, что некоторые типы фитопланктона (в частности цианобактерии) не дают максимального квантового выхода ФС II при PAR=0, как предполагается моделью, а дают его при достаточно больших уровнях PAR (20–40 мкмоль квант/м<sup>2</sup>с). При этом наблюдается начальный рост и максимум выхода перед тем, как при более высоких значениях PAR устанавливается типичное снижение. Процедура подгонки, применяемая в программе PhytoWin, пренебрегает точками данных в возрастающей части кривой квантового выхода, включая максимум.

В ответ на повышение интенсивности света для нормально функционирующих клеток фитопланктона характерно снижение уровня  $F_m$ . Это, прежде всего, связано с процессами нефотохимического тушения флуоресценции. Поскольку при длительном воздействии интенсивного света происходит закрывание реакционных центров, возникает необходимость в утилизации накапливающегося избытка световой

энергии. Для этого включаются процессы, связанные с тепловой диссипацией энергии. Такие процессы характеризуются высокой продолжительностью действия, но скорость их включения значительно ниже, чем для процессов электронного транспорта и флуоресценции. Если для флуоресценции необходимо время порядка  $10^{-6}$  с, то для нефотохимического тушения понадобится несколько секунд. Изменение квантового выхода флуоресценции при регистрации световых кривых при нормальном состоянии клеток также имеет вид гиперболической функции [151, 152].

Показатель скорости электронного транспорта является одним из основных, регистрируемых методом световых кривых. Данный параметр показывает не только скорость передачи световой энергии по цепочке акцепторов, но и отражает степень адаптации фотосинтетического аппарата к изменению условий освещенности. При достижении высоких интенсивностей действующего света скорость электронного транспорта возрастает до максимальных значений. Это происходит при убывании квантового выхода, т.е. осуществляется интенсификация процессов электронного транспорта в ответ на повышение интенсивности света. В случаях, когда этого не происходит, говорят о нарушении функционирования электрон-транспортной цепи ФС II [151, 152, 168].

Поскольку пробы воды содержали различные группы фитопланктона и флуоресцентный отклик различался для отдельных мониторинговых точек, то полученные световые кривые рассматривали для каждой из групп отдельно.

На рисунке 2.8 приведены световые кривые изменения квантового выхода флуоресценции хлорофилла для сине-зелёных водорослей. Сигнал флуоресценции для данной группы был зарегистрирован только в пяти мониторинговых точках, для которых было характерно содержание бактериохлорофилла.

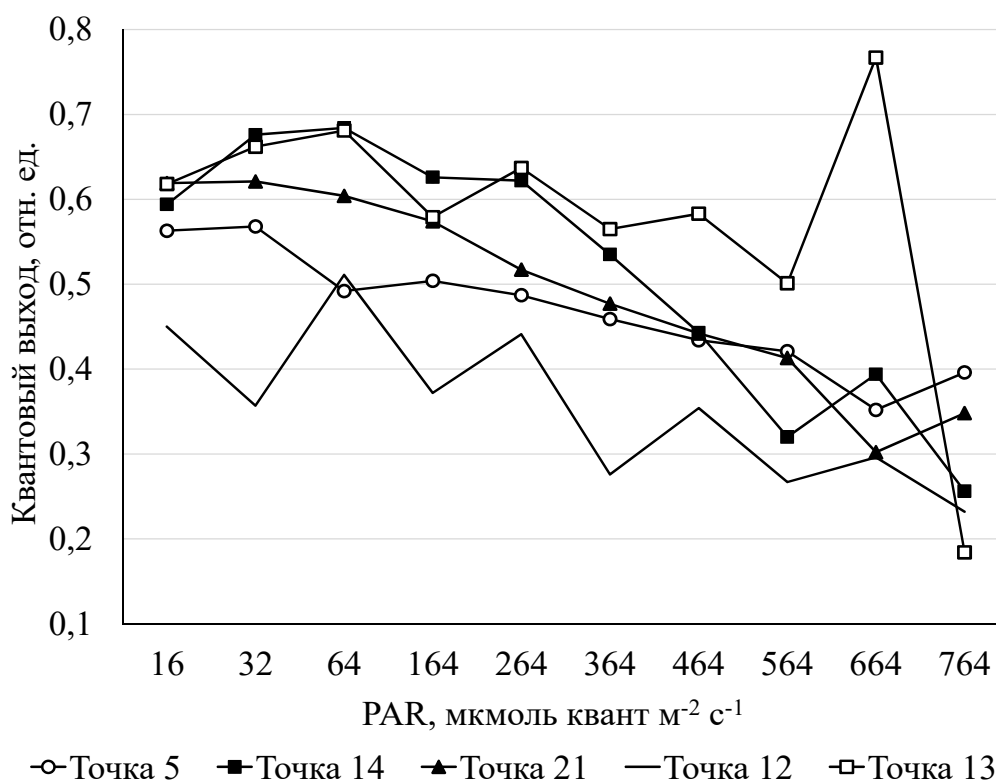


Рисунок 2.8 – Световые кривые квантового выхода флуоресценции пигментов сине-зеленых микроводорослей

Наиболее низкие значения квантового выхода были получены в мониторинговой точке 12. Примечательно, что для двух прудов около парка им. А.С. Щербакова, которые связаны между собой, показатели квантового выхода фитопланктона отличались. Так, в точке 13 (I пруд) квантовый выход был наибольшим среди наблюдаемых 5 мониторинговых точек, тогда как в точке 12 – наименьшим. Причиной таких различий может служить взаимное расположение прудов, поскольку вода из II пруда через дамбу перетекает в I пруд, где нарастание биомассы фитопланктона продолжается.

Также для световых кривых, полученных в данных точках, было характерно скачкообразное изменение квантового выхода. Так квантовый выход флуоресценции фитопланктона их точки 13 при PAR

664 мкмоль квант  $\text{м}^{-2} \text{с}^{-1}$  резко возрастал до максимальной величины (около 0,78), а затем значительно снижался при повышении освещенности до 764 мкмоль квант  $\text{м}^{-2} \text{с}^{-1}$  (до 0,2) (рис. 2.8). Квантовый выход клеток фитопланктона из точки 12 изменялся скачкообразно, попеременно уменьшаясь и увеличиваясь в ответ на повышение интенсивности действующего света. Такие изменения свидетельствуют о нарушении процессов, связанных с адаптацией к изменению освещенности среды, а также включению процессов фотоингибирования фотосистемы II.

Для мониторинговых точек 5, 14 и 21 отклонений от стандартной формы световой кривой не наблюдалось.

На рисунках 2.9 и 2.10 приведены световые кривые, полученные для хлорофилла *a*. Значения квантового выхода для данной группы были выше, чем для бактериохлорофилла – максимальные значения достигали 0,7. Более низкие значения регистрировали для мониторинговых точек 8 и 5 (рис. 2.9), а также 13 и 16 (рис. 2.10).

Отклонение формы световых кривых от заданного вида было получено для проб из точек 8 и 16, где изменения квантового выхода происходили скачкообразно, но с сохранением тенденции к убыванию с ростом значений PAR (рис. 2.9 и 2.10). Остальные световые кривые соответствовали предъявляемым требованиям.

Наибольшими отклонениями от заданной формы отличались световые кривые для группы диатомовых водорослей (рис. 2.11). Стоит отметить, что присутствие хлорофилла *b* было зарегистрировано в 19 мониторинговых точках (табл. 2.1), однако, световые кривые были получены только для 8 из них. Для остальных 11 точек были получены точечные отклики флуоресценции при отдельных значениях PAR, которые затем снижались до нулевых значений. При дальнейшем анализе световых кривых подобные данные учитывать невозможно. Такие результаты, как правило, были получены для проб воды с содержанием хлорофилла *b* ниже

0,3 мкг/л. Это может быть связано с низкими, близкими к пороговым значениям, интенсивностями флуоресценции, которые на фоне флуоресценции от других пигментных групп не различались прибором в качестве отдельного сигнала.

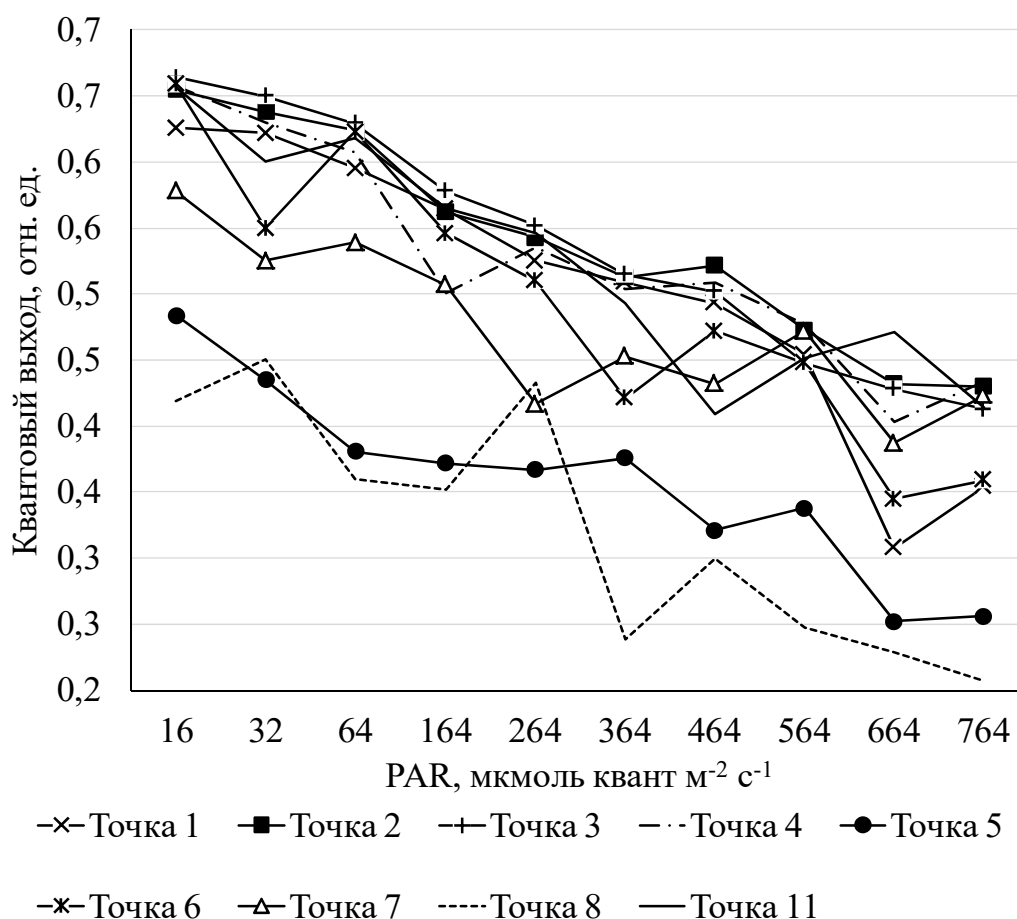


Рисунок 2.9 – Световые кривые квантового выхода флуоресценции хлорофилла *a* в мониторинговых точках русла реки Кальмиус (точки 1–8, 11)

Кроме того, области испускания хлорофиллов групп *a* и *b* перекрываются, что при неравном соотношении данных типов хлорофилла в пробе воды может приводить к пере- или недооценке содержания отдельной группы пигментов. Поскольку в большинстве проб было выявлено присутствие хлорофилла *a*, а также принимая во внимание тот

факт, что концентрации данного пигмента были в большинстве случаев выше, чем содержание хлорофилла *b*, можно предположить о неправильной оценке сигналов флуоресценции для данных двух групп фотопигментов в отдельных мониторинговых точках, что приводило к регистрации полученных световых кривых.

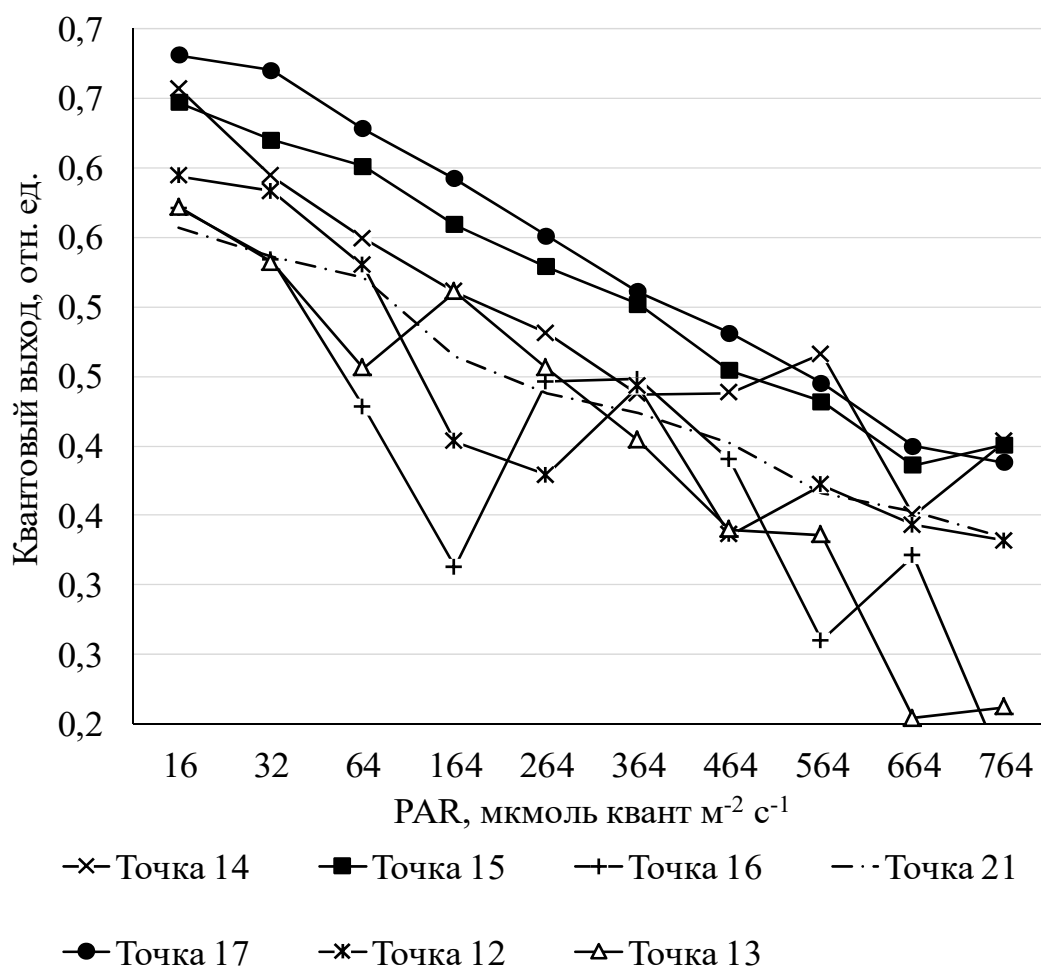


Рисунок 2.10 – Световые кривые квантового выхода флуоресценции хлорофилла *a* в мониторинговых точках русла реки Кальмиус (точки 12–17, 21)

Подобный результат был получен для мониторинговых точек 9 и 17, где содержание хлорофилла *b* было относительно высоким – 0,41 и 1,08 мкг/л соответственно. Также стоит отметить, что для проб воды из

данных точек были получены сравнительно высокие показатели максимального квантового выхода и максимального электронного транспорта (рис. 2.15 b). Такой результат можно объяснить низкими адаптационными свойствами клеток фитопланктона к высоким интенсивностям действующего света, а также возможным угнетением их нормального функционирования.

Нормальную форму световой кривой получили только для мониторинговой точки 19 (рис. 2.11), в которой содержание хлорофилла *b* было одним из наибольших (табл. 2.1).

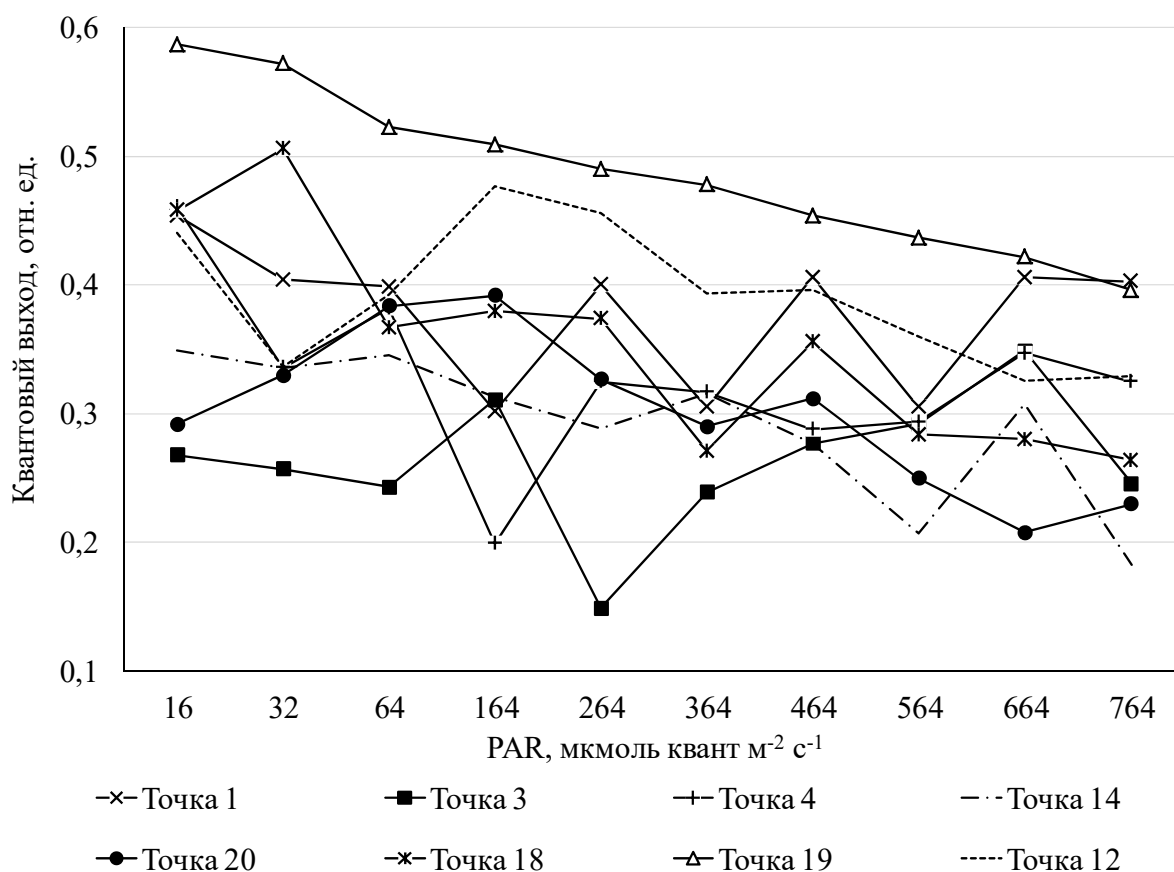


Рисунок 2.11 – Световые кривые квантового выхода флуоресценции хлорофилла *b* в мониторинговых точках

Таким образом, световые кривые для квантового выхода флуоресценции характеризовались высокой степенью разброса в зависимости от пигментного состава проб воды.

Кроме квантового выхода флуоресценции также выполняли регистрацию световых кривых изменения скорости электронного транспорта (electron transfer rate – ETR). Запись кривых также была выполнена для трех основных групп фитопланктона.

На рисунке 2.12 представлены значения ETR для цианобактерий. Для данной группы также были получены световые кривые только для пяти мониторинговых точек.

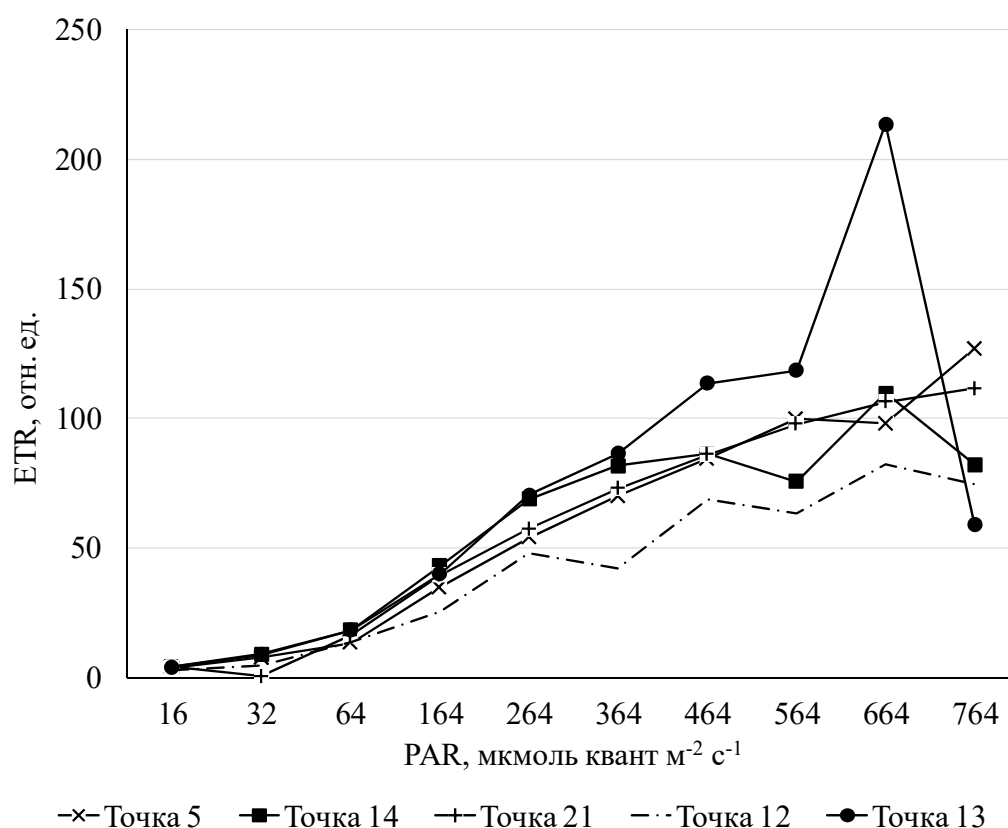


Рисунок 2.12 – Световые кривые скорости электронного транспорта для сине-зеленых микроводорослей

Разделение по значениям скоростей ETR было получено начиная с интенсивности действующего света 264 мкмоль квант  $\text{м}^{-2} \text{с}^{-1}$ . Скорость транспорта была ниже для клеток фитопланктона из точки 21 (пруд Алексеевский), при повышении интенсивности света данная тенденция сохранялась. Наибольшие показатели скорости транспорта были получены для мониторинговых точек 13 и 14. Однако, после увеличения PAR до 464 мкмоль квант  $\text{м}^{-2} \text{с}^{-1}$  и выше показатели ETR для пробы из III пруда снижались. Также было определено возрастание скорости транспорта при 664 мкмоль квант  $\text{м}^{-2} \text{с}^{-1}$  до максимума, а затем стремительное снижение до минимальных значений при 764 мкмоль квант  $\text{м}^{-2} \text{с}^{-1}$ , что также может быть обусловлено нарушением световых адаптационных механизмов клеток.

На рисунке 2.13 приведены световые кривые для группы микроводорослей, преимущественно содержащих хлорофилл *a*. На графике приведено 16 световых кривых, не представлены результаты измерений скорости транспорта для мониторинговой точки 18 (оз. Кирша), поскольку до интенсивности 564 мкмоль квант  $\text{м}^{-2} \text{с}^{-1}$  не было зарегистрировано сигнала флуоресценции достаточной интенсивности. Однако, при максимальной освещенности показатель ETR для данной пробы возрастал до 110 отн. ед.

Значительное разделение в показателях ETR было получено начиная с интенсивности 364 мкмоль квант  $\text{м}^{-2} \text{с}^{-1}$  и более. Наименьшие показатели ETR получили для мониторинговых точек 5, 8, 13 и 16. Для мониторинговых точек 5 и 13 характерно наличие синезеленых водорослей, которые способны оказывать угнетающее действие на другие виды фитопланктона. Примечательно, что в мониторинговой точке 16 (слив из пруда Молодежный) были получены низкие показатели ETR, тогда как в месте притока воды в данный водоем (точка 15) зарегистрированы высокие

значения исследуемого параметра, что свидетельствует о наличии фактора, снижающего интенсивность передачи электронов в фотосистеме II.

Точка 8 расположена в непосредственной близости к потенциальному источнику загрязнения русла реки Кальмиус, следовательно, низкие показатели ETR могут свидетельствовать о попадании загрязняющих веществ. В остальных мониторинговых точках были получены высокие значения показателя скорости транспорта, а световые кривые имели нормальную форму (рис. 2.13).

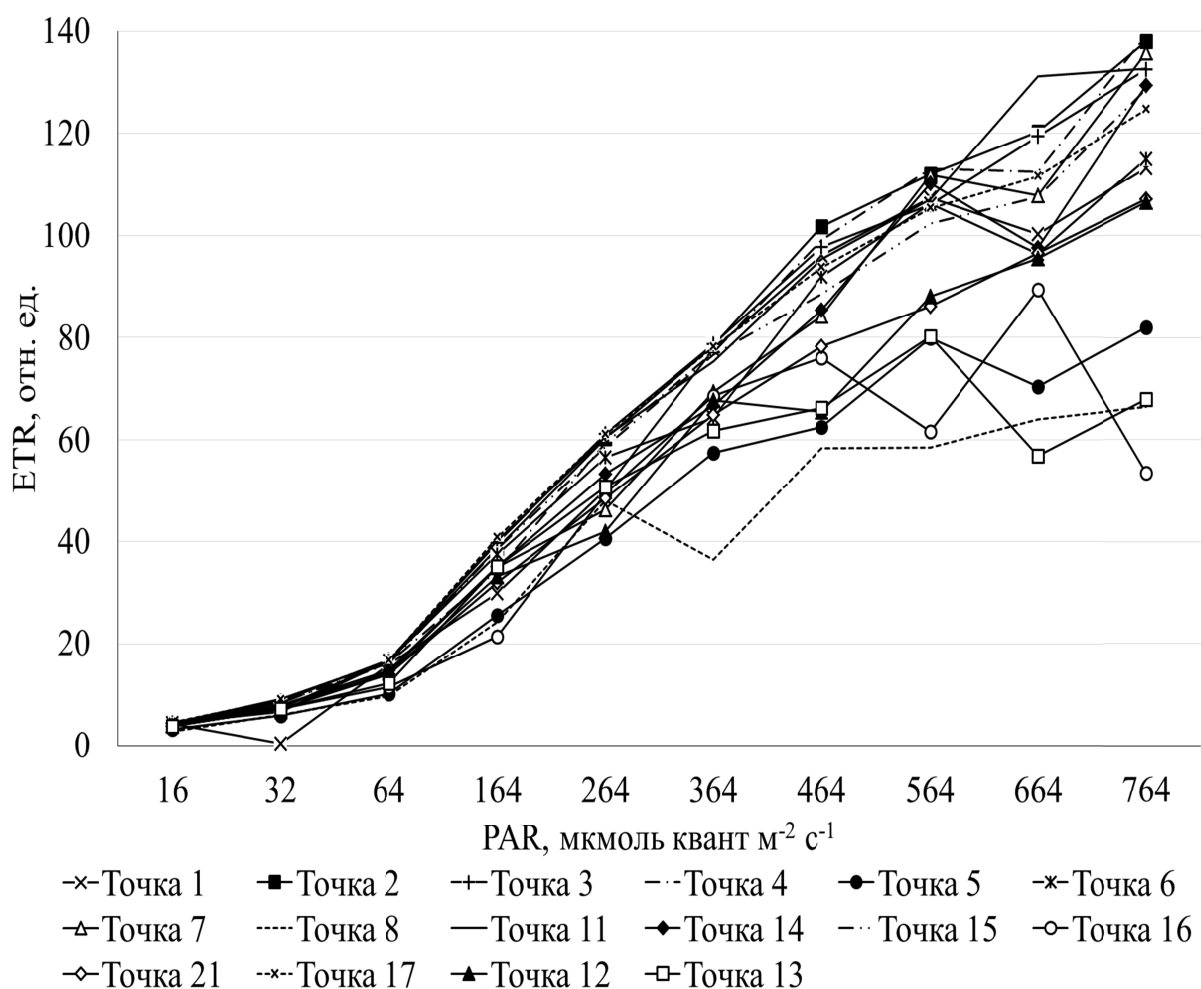


Рисунок 2.13 – Световые кривые скорости электронного транспорта для хлорофилла *a* в мониторинговых точках

На рисунке 2.14 приведены световые кривые для группы микроводорослей, преимущественно содержащих хлорофилл *b*. На графике изображено 15 световых кривых, не представлены результаты измерений для мониторинговых точек 6, 7, 13 и 16. Поскольку в мониторинговых точках 6, 7 и 13 наблюдали низкие концентрации хлорофилла *b*, то возможно, что при регистрации световых кривых сигнал был определен для группы хлорофилл *a*-содержащих микроводорослей. В пользу данного предположения также указывает отсутствие сигнала флуоресценции для данного канала регистрации при низких интенсивностях PAR, а затем резкое возрастание сигнала при высоких интенсивностях освещения (данные не приведены), поскольку значительное повышение интенсивности действующего света усиливает флуоресцентный отклик.

Разделение по показателю ETR при максимальной освещенности для данной группы было наибольшим (в сравнении с другими двумя группами клеток фитопланктона). Наименьшие значения были получены для проб из мониторинговых точек 8, 10 и 15. Для мониторинговой точки 8 были характерны низкие значения ETR и при 470 нм (рис. 2.13), что также может свидетельствовать о загрязнении данного участка русла реки. Поскольку снижения содержания хлорофилла *a* и *b* в данной мониторинговой точке не наблюдали, то, возможно пороговое (около предельно допустимых значений) загрязнение, при котором происходит угнетение состояния клеток фитопланктона, не приводящее к их гибели. Кроме того, после данной точки происходит слияние русла реки Дурная с рекой Кальмиус, т.е. имеет место значительное разбавление, в результате чего превышения предельно допустимых норм может и не происходить. Для проб фитопланктона, отобранных в точках 10 и 15, было характерно нарушение процессов световой адаптации, т.к. при значениях PAR 664 и

764 мкмоль квант  $\text{м}^{-2} \text{с}^{-1}$  происходило резкое снижение показателя ETR (рис. 2.14).

Значения ETR в пределах от 60 до 90 отн. ед. были получены для проб из 7 мониторинговых точек: 2, 3, 9, 11, 14, 18 и 20. При этом для клеток фитопланктона в мониторинговых точках 3, 11 и 14 регистрировали нарушение световой адаптации в виде резкого снижения скорости транспорта в ответ на высокие значения PAR (рис. 2.14). Для точек 2, 9, 18 и 20 световые кривые имели нормальную форму.

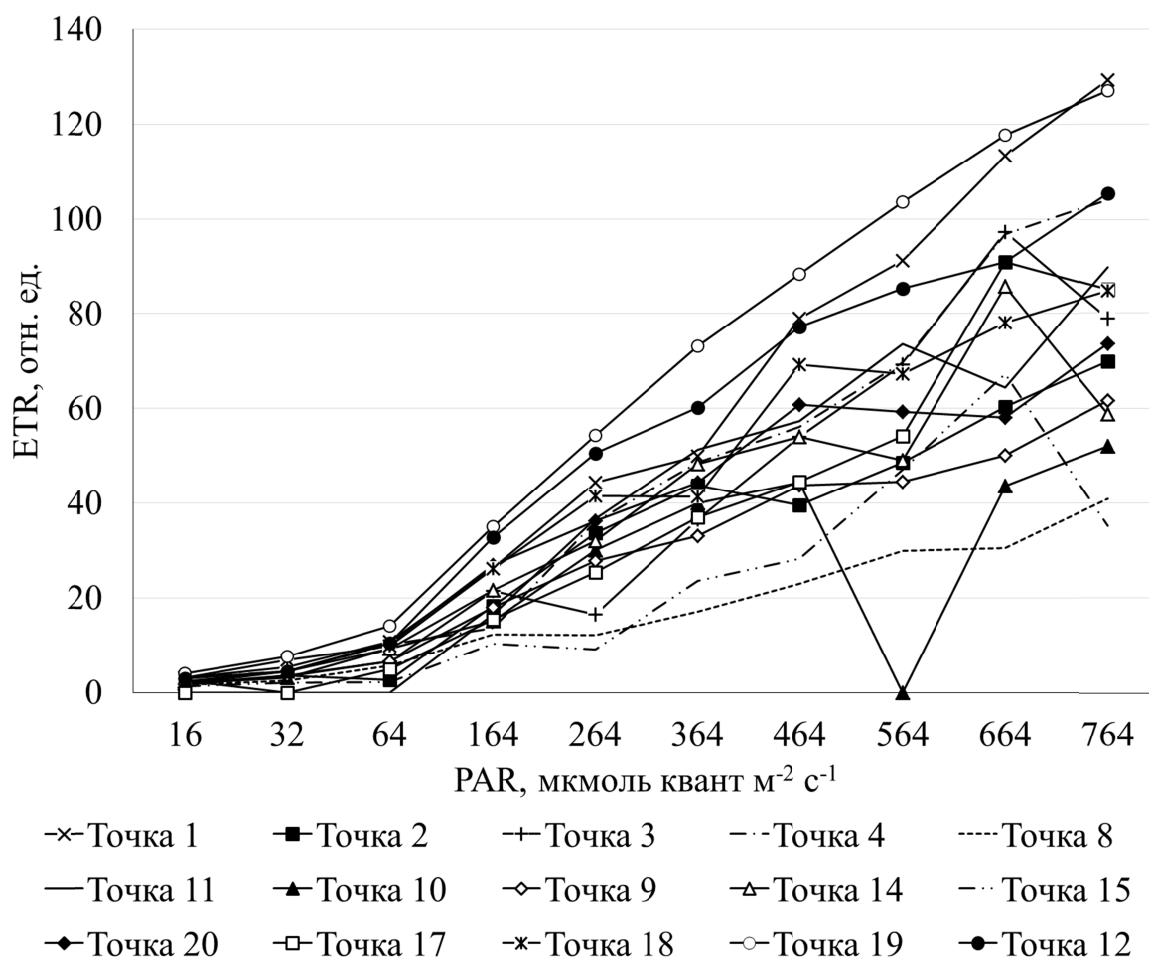


Рисунок 2.14 – Световые кривые скорости электронного транспорта для хлорофилла *b* в мониторинговых точках

Наибольшие значения ETR были зарегистрированы для точек 1 и 19 – около 130 отн. ед. Показатели ETR для фитопланктона в мониторинговых точках 4 и 12 были несколько ниже и составляли около 106 отн. ед. При этом форма световых кривых не отличалась от стандартной.

Согласно многочисленным исследованиям при регистрации световых кривых также обращают внимание на такие показатели как максимальный квантовый выход флуоресценции и максимальную скорость электронного транспорта (ETR(max)) [151–154]. Данные показатели отражают максимально возможные показатели эффективности преобразования и передачи поглощенной световой энергии [151].

На рисунке 2.15 приведены нормированные значения максимального квантового выхода и ETR(max), разделенные по пигментным группам, для каждой мониторинговой точки, в которой был зарегистрирован сигнал флуоресценции для данной группы фитопланктона.

Для канала 470 нм (хлорофилл *a*) значения исследуемых параметров были получены для 19 мониторинговых точек. Наиболее низкие значения квантового выхода на 470 нм наблюдали для мониторинговых точек 8, 10 и 5 (рис. 2.15 а). Также для точек 5 и 8 были характерны наиболее низкие показатели ETR(max), что свидетельствует об ухудшении «физиологического» состояния фитопланктона, поскольку для точек, расположенных выше по течению (точки 6 и 7) были характерны более высокие значения данных параметров. Наибольшие значения квантового выхода были получены в мониторинговой точке 20 (пруд Алексеевский), однако данный показатель снижался на 20% в точке перелива воды из пруда (точка 21). Для остальных мониторинговых точек были характерны высокие значения исследуемых параметров.

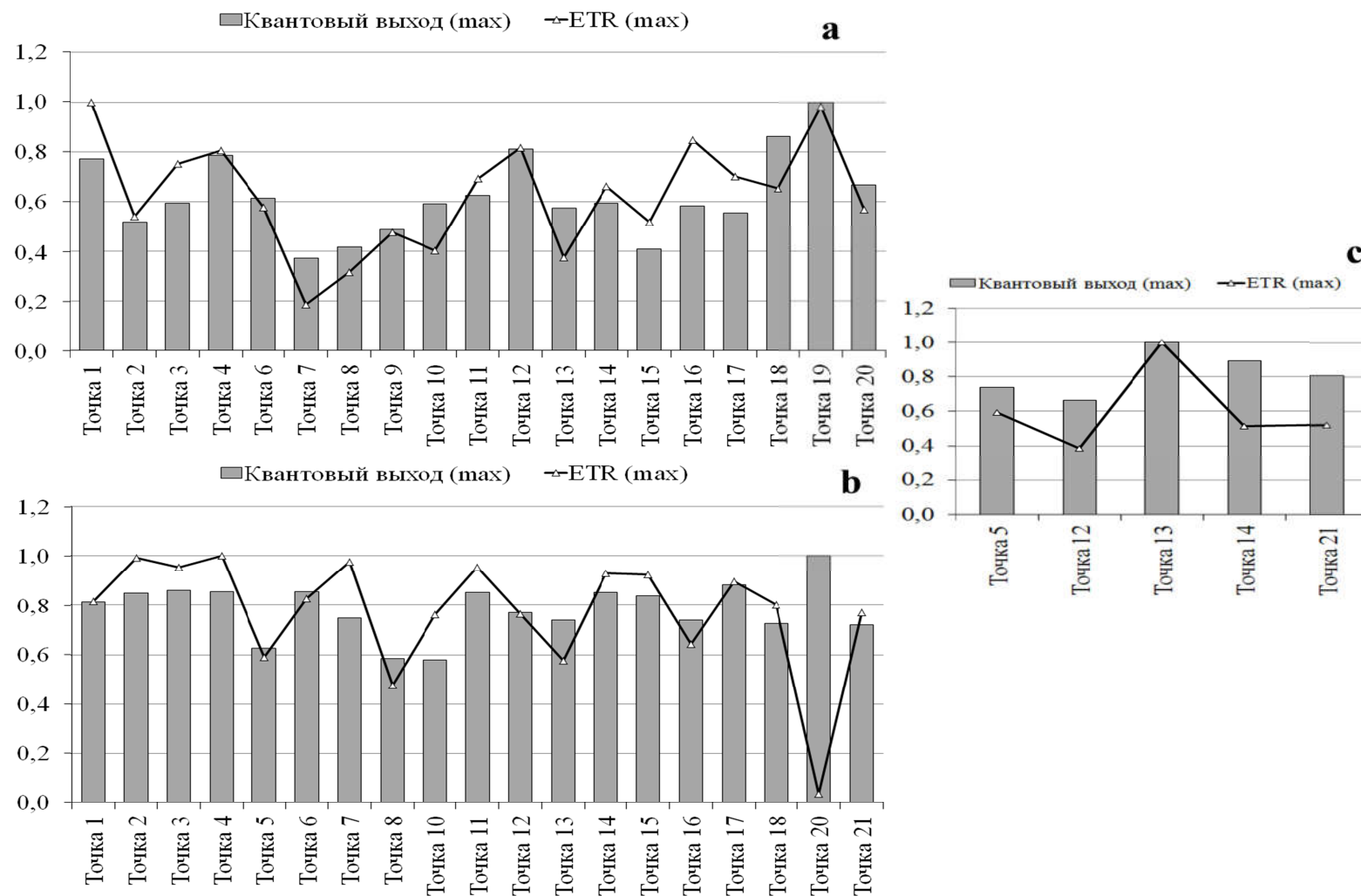


Рисунок 2.15 – Показатели максимального квантового выхода флуоресценции и электронного транспорта (ETR(max))

для клеток, содержащих преимущественно: а – хлорофилл *a* ; б – хлорофилл *b*; с – бактериохлорофилл

Для канала 520 нм (хлорофилл *b*) значения исследуемых параметров были получены для 19 мониторинговых точек. Наибольшие показатели квантового выхода были получены для точек 1 и 19, при этом для пробы воды из водохранилища Донецкое море были характерны наибольшие значения ETR(max) (рис. 2.15 b). Также высокими значениями квантового выхода отличались мониторинговые точки 4, 12 и 18, а для точек 4, 12 и 16 были зарегистрированы высокие значения ETR(max). Стоит отметить, что при регистрации световых кривых при максимальных значениях PAR были характерны средние в сравнении с остальными точками значения. Следовательно, данные параметры показывают максимально возможную эффективность функционирования фотосинтетического аппарата клеток фитопланктона, но не отражают эффективность механизмов адаптации к быстрому изменению интенсивности падающего света.

Наименьшие значения квантового выхода были зарегистрированы в точках 7, 8 и 15, для точек 7 и 8 также были характерны и минимальные значения скорости электронного транспорта, что также указывает на действие негативных факторов в данных мониторинговых точках, в частности в точке 8, для которой были получены низкие значения и на 470 нм (рис. 2.15 a).

Для канала 645 нм (бактериохлорофилл) значения исследуемых параметров были получены для 5 мониторинговых точек. Наибольшие значения квантового выхода и ETR(max) были получены для пробы воды из мониторинговой точки 13 (рис. 2.15 c). Также высокие показатели квантового выхода регистрировали в точках 14 и 21, тогда как в точке 12 данный параметр был наименьшим. Значения ETR(max) изменялись в соответствии с квантовым выходом.

### 2.1.3 Регистрация кривых индукции флуоресценции хлорофилла

Кривые индукции флуоресценции регистрировали после 30 минутной темновой адаптации проб воды, чтобы избежать влияния процессов нефотохимического тушения флуоресценции, а также включения естественных адаптационных процессов к условиям изменения освещенности. Среди полученных параметров определяли показательные тест-функции, отражающие изменения состояния клеток фитопланктона.

Во время мониторинга было выявлено 9 наиболее показательных тест-функций, среди которых можно выделить базовые показатели флуоресценции –  $F_0$ ,  $F_m$  и  $\Phi_0 = F_v/F_m$ ; параметры, отражающие функционирование переносчиков электронов фотосистемы II –  $M_0$ ,  $V_i$  и  $Area$ ; параметры эффективности работы фотосинтетического аппарата –  $\Psi_0$ ,  $\Phi_{E_0}$  и  $PI$ . Данные показатели приведены на рисунках 2.16 и 2.17.

Наиболее высокие показатели минимальной и максимальной флуоресценции хлорофилла были получены для мониторинговых точек 5, 17 и 21 (рис. 2.16 а), что, прежде всего, связано с более высоким содержанием хлорофилла в данных пробах (рис. 2.6 и табл. 2.1). Для исследуемых водоемов были характерны более высокие показатели  $F_0$  и  $F_m$  (точки 12–21), в сравнении с руслом реки, что объясняется отсутствием высокой скорости течения. Наименьшие значения данных параметров наблюдали в мониторинговых точках 7, 8 и 9, которые характеризовались низкими концентрациями фотопигментов (рис. 2.6 и табл. 2.1).

Показатели квантового выхода  $F_v/F_m$  находились в области «физиологической» нормы для фитопланктона – в пределах от 0,5 до 0,62 отн. ед. (рис. 2.16 б). Однако, для отдельных мониторинговых точек данный параметр находился на границе нормы (0,5 отн. ед.) – точки 5, 8 и 10.

Примечательно, что не смотря на высокие значения  $F_0$  и  $F_m$  для точки 5 были получены наиболее низкие значения квантового выхода. Поскольку для данной мониторинговой точки было характерно интенсивное разрастание клеток фитопланктона, то снижение параметра  $F_v/F_m$  свидетельствует о прекращении нарастания биомассы, а также о снижении скорости размножения клеток, т.к. по некоторым литературным данным соответствующий показатель связан со скоростью роста клеток фитопланктона [169]. Наиболее высокие показатели квантового выхода были получены в начальных мониторинговых точках (точки 1–4), также высокие показатели  $F_v/F_m$  наблюдали в точках 6 и 7 (рис. 2.16 б).

Сравнительно низкие значения квантового выхода были получены для проб из русла р. Дурная (точки 9 и 10), а также около ПАО «Донецкий металлургический завод» (точка 8). Несмотря на то, что квантовый выход на данных участках русла оставался в пределах нормы, резкое снижение данного показателя между точками 7 и 8 может свидетельствовать о загрязнении данного участка русла. Для большинства исследуемых водоемов были характерны значения  $F_v/F_m$ , близкие к 0,55 отн. ед. Более низкие значения  $F_v/F_m$  были в мониторинговой точке 18.

Усредненная величина начального наклона относительной переменной флуоресценции хлорофилла *a* ( $M_0$ ), отражающая скорость закрывания реакционных центров фотосистемы II, не отличалась для большинства мониторинговых точек и оставалась довольно высокой (рис. 2.16 с). Однако, стоит отметить низкие значения  $M_0$  в мониторинговой точке 5. Если учесть низкие показатели квантового выхода для данной пробы, можно предположить не только о снижении скорости нарастания численности клеток фитопланктона, но и о замедлении функционирования реакционных центров и электрон-транспортной цепи фотосистемы II, поскольку показатели скорости электронного транспорта и квантового выхода при регистрации световых кривых также были невысокими (рис. 2.13, рис. 2.15 а и рис. 2.15 с).

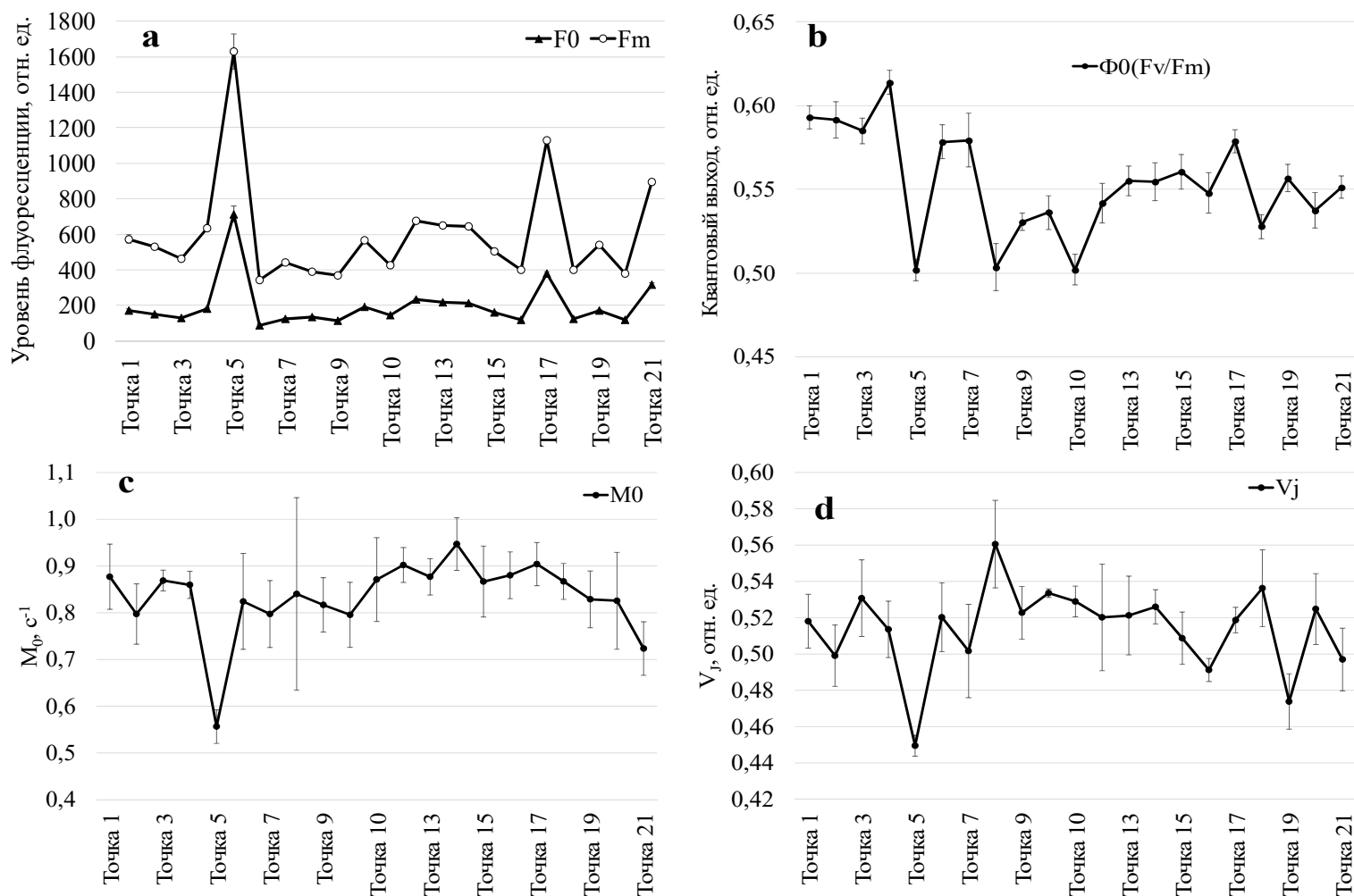


Рисунок 2.16 – Некоторые параметры ОЖР-кривых для проб воды: а – уровни минимальной ( $F_0$ ) и максимальной ( $F_m$ ) флуоресценции; б – квантовый выход флуоресценции ( $F_v/F_m$ ); в – скорость закрывания реакционных центров фотосистемы II ( $M_0$ ); д – относительная величина переменной флуоресценции во время фазы I ( $V_i$ )

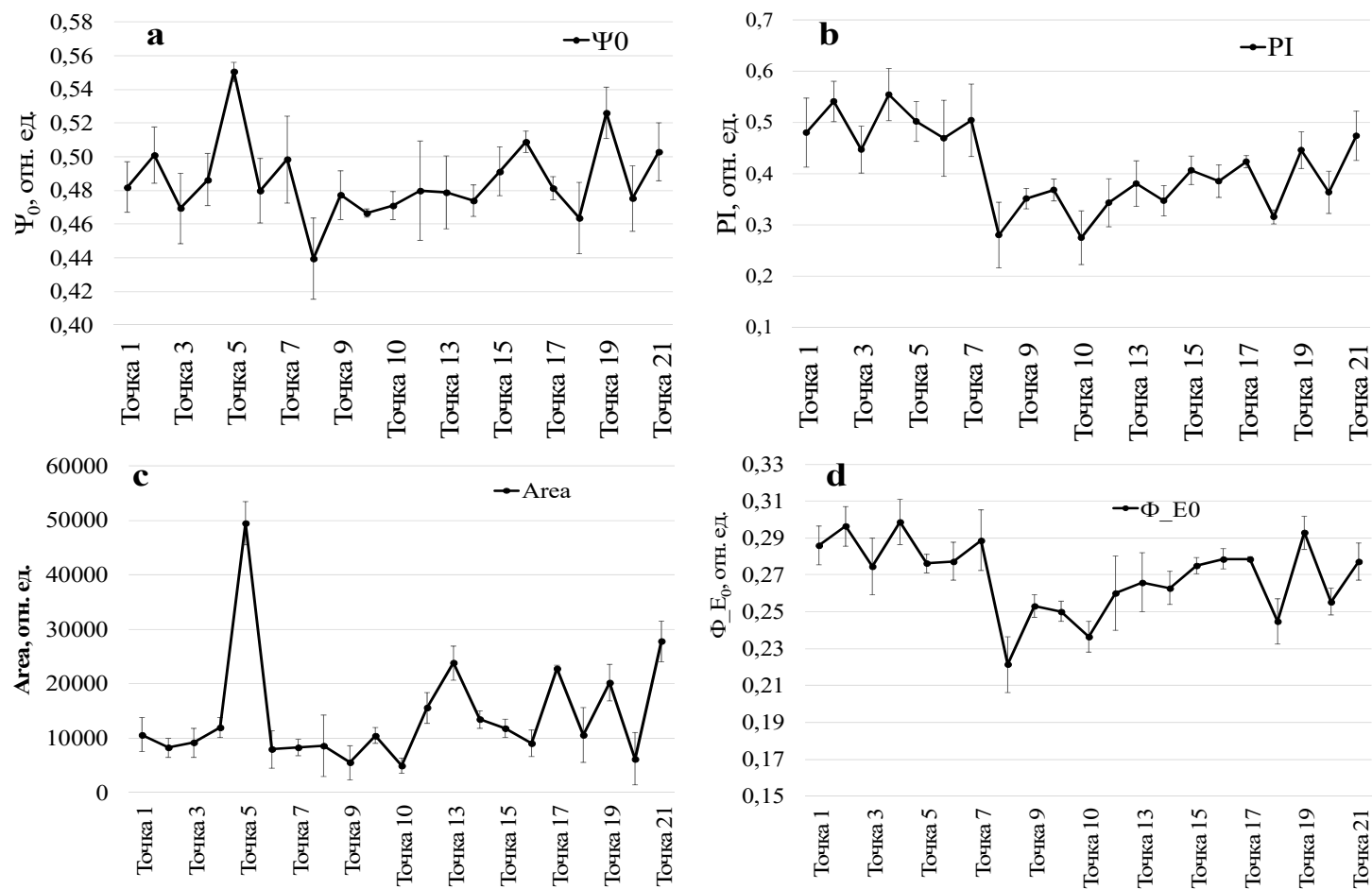


Рисунок 2.17 – Некоторые параметры ОЛР-кривых для проб воды: а – вероятность транспорта электронов за пределы  $Q_a^-$  ( $\Psi_0$ ); б – квантовая эффективность переноса электронов от  $Q_a^-$  ( $\Phi_{E_0}$ ); в – индекс производительности (PI); г – площадь над кривой индукции флуоресценции (Area)

Еще одной показательной тест-функцией служил параметр  $V_i$ , отражающий относительную величину переменной флуоресценции во время фазы I на ОЛР-кривой.  $V_i$  является показателем степени связи между фотосистемами I и II, т.к. он отражает способность фотосистемы I и ее акцепторов окислять  $PQH_2$ , т.е. «разгружать» фотосистему II [151, 154]. Для всех мониторинговых точек, кроме точек 5 и 21, не наблюдали никаких значимых различий в значениях показателя  $V_i$  (рис. 2.16 d). Значительно более низкие значения были получены для точек 5 и 21, что также может объяснить высокую емкость пула акцепторов ( $M_0$ ). С одной стороны изменение водного режима создает более благоприятные условия для клеток фитопланктона, с другой – снижение способности фотосистемы I к окислению пула пластохинонов приводит к замедлению электронного транспорта, поскольку вторичные хинонные переносчики не успевают передавать электроны дальше по цепочке. Это отражается в снижении скорости электронного транспорта, а также приводит к необходимости увеличения пула хинонов. Кроме того, снижение параметра  $V_i$  и увеличение  $M_0$  также приводило к увеличению эффективности переноса электронов на участке электрон-транспортной цепи от первичного хинонного переносчика  $Q_a$  до пула пластохинонов – параметр  $\Psi_0$  (рис. 2.17 а). Т.е. в результате снижения активности фотосистемы I включались механизмы, призванные компенсировать данные изменения (параметры  $V_i$  и  $M_0$ ). Таким образом, в мониторинговых точках 5 и 21 наблюдали негативные изменения в функционировании фотосинтетического аппарата клеток фитопланктона.

В остальных мониторинговых точках параметр  $\Psi_0$  изменялся в равных пределах (рис. 2.17 а).

Для квантовой эффективности переноса электронов от  $Q_a^-$  (параметр  $\Phi_{E_0}$ ) наиболее низкие значения были характерны на участке русла реки Кальмиус после ПАО «Донецкий металлургический завод» – точки 8 и 11, а также в русле реки Дурная – точки 9 и 10 (рис. 2.17 b). Также

относительно низкие значения  $\Phi_{E_0}$  были получены в мониторинговой точке 18. Значения данного показателя в остальных мониторинговых точках не отличались. Для мониторинговых точек 2, 4, 7 и 19, где наблюдали более высокие средние значения  $\Phi_{E_0}$ , были характерны более высокие значения предела погрешности (рис. 2.17 b). Снижение квантовой эффективности в мониторинговых точках 8 и 11 может быть связано с загрязнением данного участка русла, как предполагалось ранее на основании изменений других фотосинтетических параметров. Уменьшение показателя  $\Phi_{E_0}$  в точках 9 и 10 может быть связано с более низким температурным фоном, т.к. температура воды для данных проб составляла около 14°C. Данное предположение основывается на литературных данных, где указана прямая зависимость между температурой и квантовой эффективностью [170].

Наиболее часто показательной тест-функцией является фотосинтетический индекс продуктивности (PI) [171, 172]. Данный показатель является интегральным и отражает функциональную активность фотосистемы II по отношению к поглощенной световой энергии [151]. Стоит отметить, что индекс продуктивности не превышал значения 0,6 для всех исследуемых мониторинговых точек (рис. 2.17 c). Наибольшие значения PI были получены для начальных мониторинговых точек (точки 1 и 2), а также для мониторинговых точек Нижнекальмиусского водохранилища (точки 3–6). После перехода реки Кальмиус из водохранилища в узкое русло данный показатель значительно снижался (примерно на 30%). Показатели PI для реки Дурная и мониторинговых точек 7, 8 и 11 оставались низкими, что также согласуется с результатами измерений другого интегрального показателя – квантового выхода флуоресценции. Также низкие значения индекса продуктивности были получены для мониторинговой точки 18. В общем, для исследуемых водоемов значения PI были ниже, чем в пробах из Нижнекальмиусского водохранилища, где

был сходный гидрорежим. Для мониторинговых точек 5 и 21 значительных отклонений исследуемого параметра не наблюдали (рис. 2.17 с).

Площадь над индукционной кривой (*Area*), отражающая емкость пула электронных акцепторов, была сравнительно одинакова для всех мониторинговых точек русла рек Кальмиус и Дурная (точки 1–11), кроме точки 5 (рис. 2.17 d). Данный показатель для водоемов был выше, поскольку количество световой энергии, попадающей в антенные комплексы клеток фитопланктона больше, чем в русле реки. Данное утверждение можно проверить на примере пруда Алексеевский (точки 20 и 21). Приток воды в пруд осуществляется посредством впадения ручья с узким руслом и относительно высокой скоростью течения. В данной точке емкость пула переносчиков близка к показателям из мониторинговых точек русла реки Кальмиус и Дурная. Уже на выходе из пруда, после вегетации в условиях водоема с очень низкой скоростью течения, емкость пула переносчиков для клеток фитопланктона значительно возрастала (в 2,5–3 раза). Такую же тенденцию наблюдали для двух связанных прудов на территории парка им. А.С. Щербакова (точки 12 и 13). Однако, так как скорость течения в каждом из прудов мала, то и разность между значениями параметра *Area* не так значительна, как для пруда Алексеевский.

## **2.2 Биотестирование токсичности проб воды реки Кальмиус на культурах фитопланктона с применением методов флуориметрии**

Биотестирование проводили в стерильных условиях при оптимальной температуре ( $20 \pm 2$ ) °C и освещении от 2000 до 3000 лк со световым режимом 12 часов – день, 12 часов – ночь.

Пробы воды предварительно фильтровали через ацетицеллюлозные мембранные фильтры типа МФАС–ОС–4 фирмы «Владипор» с диаметром пор 0,6 мкм с помощью насоса Комовского с целью удаления зоопланктона и клеток природного фитопланктона.

Для эксперимента использовали культуру микроводорослей *Chlorella sorokiniana*, находящуюся в стадии экспоненциального роста. Численность клеток в суспензии, которую использовали в эксперименте, составляла от 5 до 10 млн. кл. / см<sup>3</sup>.

Перед экспериментом проверяли чувствительность культуры микроводорослей воздействием эталонного токсиканта – калия двуххромовокислого. Критерием пригодности культуры к биотестированию является величина LC<sub>50</sub> в диапазоне концентраций от 0,4 до 0,9 мг/дм<sup>3</sup> калия двуххромовокислого за 96 часов экспозиции.

При разработке методики по оценке токсичности проб воды за основу были взяты рекомендации Р 52.24.808–2014 [173]. В отличие от предложенных рекомендаций вместо спектрофотометрического определения содержания хлорофилла *a* в исследуемых пробах, выполняли флуориметрическое определение содержания фотопигмента, а также регистрировали кривые индукции флуоресценции и световые кривые флуоресценции хлорофилла с целью более точного определения состояния тест-культуры фитопланктона.

Кроме того, существующая методика не предусматривает статистическую обработку полученных данных – показателем отклонения от контрольных параметров считается снижение или повышение среднего значения исследуемого параметра на 25–50% относительно контрольной группы. Поэтому, кроме предлагаемых расчетов отклонений, выполняли вычисление ошибки среднего и 95% доверительного интервала ошибки среднего. Достоверность отличий между опытными и контрольными группами определяли с помощью критерия Вилкоксона.

### 2.2.1 Оценка содержания хлорофилла и скорости роста тест-культуры *Chlorella sorokiniana*

При проведении биотестирования проб воды, обладающих острой токсичностью, выявлено не было. При этом были зафиксированы отдельные отклонения от контрольных значений.

На рисунке 2.18 показаны значения коэффициента прироста численности клеток исследуемых проб через 24 часа экспозиции, контрольные значения выделены серым цветом. Достоверные отличия коэффициента прироста были получены для проб из точек 9 и 11, который был значительно ниже контрольных значений. При этом отклонение от контрольных значений для проб из мониторинговой точки 9 составляло 50%, а для точки 11–35,8%. Этого достаточно для установления токсичности пробы при условии, что содержание хлорофилла в данных пробах также будет достоверно отличаться от контрольных значений.

Стоит отметить разность между контрольными группами (Контроль и Контроль 2), которая обусловлена различиями в начальной численности клеток. Однако начальная численность клеток, как в контрольных, так и в опытных образцах была одинаковой, что проверялось счетным методом сразу после посева тест-культуры в соответствующую среду. В среднем, за 24 часа тестовые культуры нарастали на 80–100% в сравнении с начальной численностью.

После 96 часов экспозиции происходило более сильное снижение роста культур *Chlorella sorokiniana*. Достоверные отличия от контрольных значений были получены для точек 1, 5, 6, 9, 11, 19 и 21 (рис. 2.19). Не отличались от контрольных только тест-культуры, произрастающие на фильтрате из проб воды пруда Молодежный и пруда парка им. А.С. Щербакова.

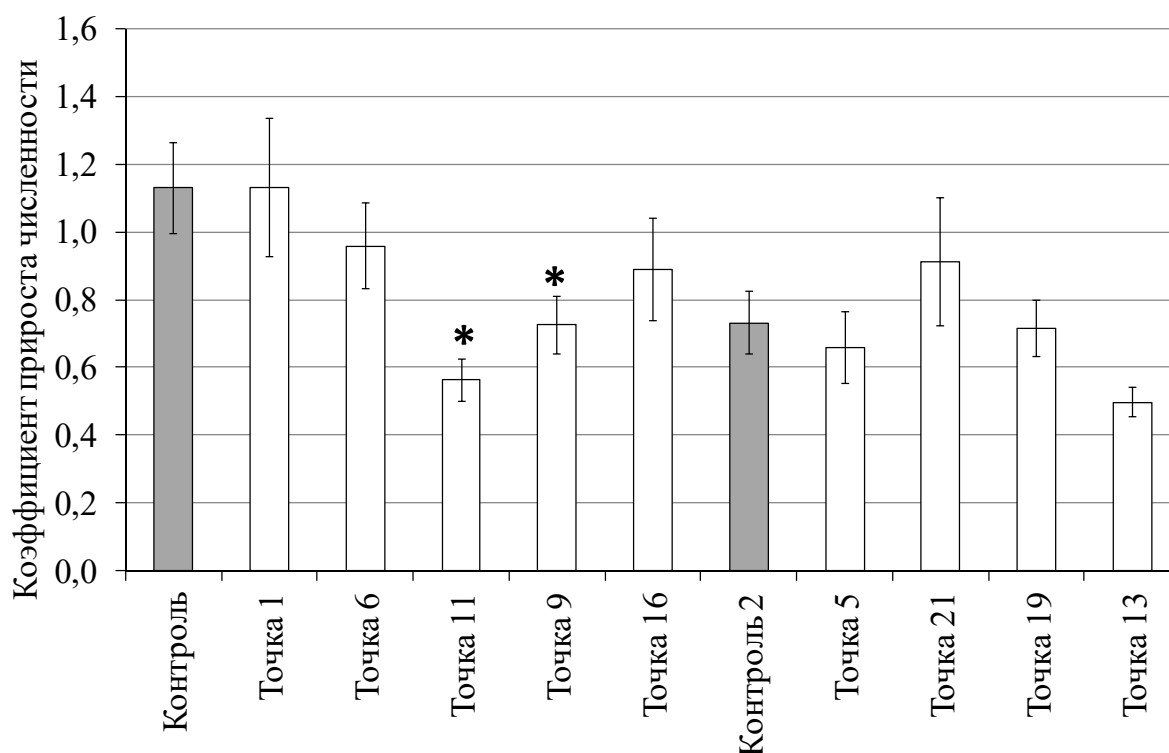


Рисунок 2.18 – Значения коэффициента прироста числа клеток *Chlorella sorokiniana* через 24 часа биотестирования (\* – отличия от контроля достоверны ( $p < 0,05$ ))

Отклонение коэффициента прироста от контрольных значений в точке 1 составило 38,6%, в точке 5 – 69,3%, в точке 6 – 36,5%, в точке 9 – 53,0%, в точке 11 – 62,9%, в точке 19 – 76,4%, в точке 21 – 89,1%. Все полученные значения отражали отклонение в сторону более низкой численности клеток. Таким образом, для всех указанных проб выполняется требование по установлению токсичности – отклонение на 25 и более процентов от контрольных значений.

После 24-часовой экспозиции достоверные отличия концентрации хлорофилла *a* от контрольных значений были получены для 7 из 9 исследуемых мониторинговых точек – 1, 5, 6, 9, 11, 16 и 19 (рис. 2.20).

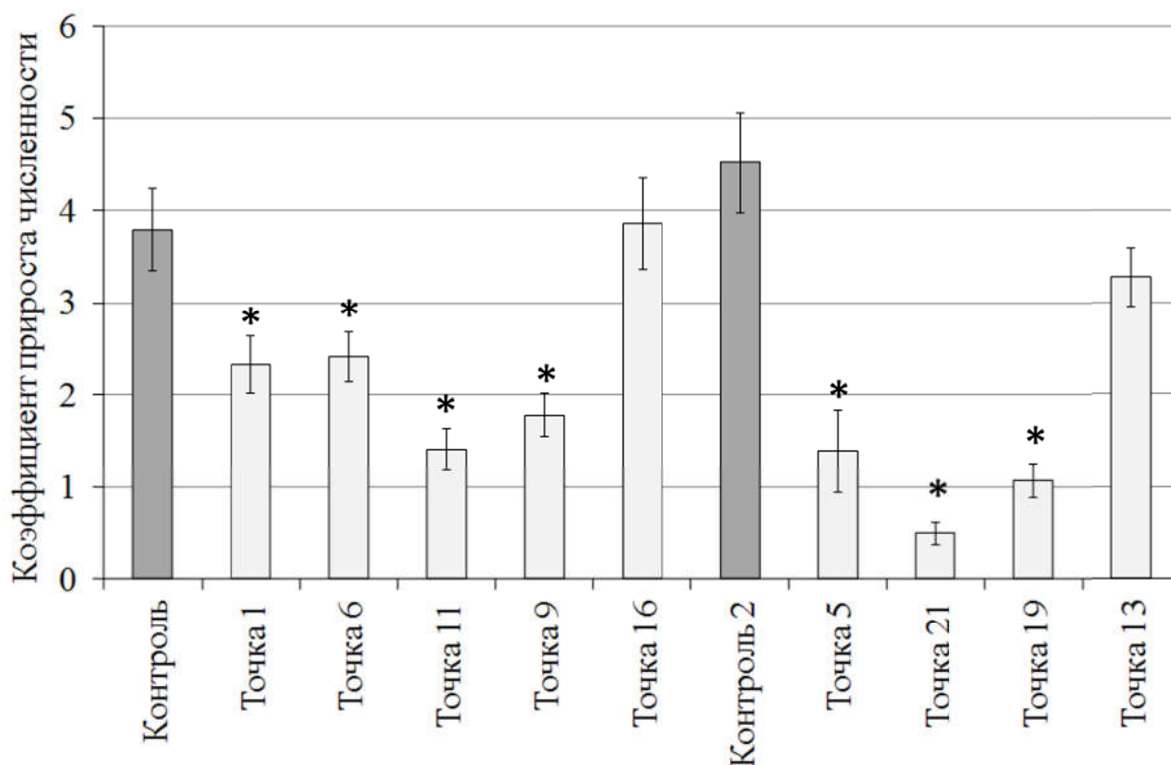


Рисунок 2.19 – Значения коэффициента прироста числа клеток

*Chlorella sorokiniana* через 96 часов биотестирования

(\* – отличия от контроля достоверны ( $p < 0,05$ ))

Отклонение концентрации хлорофилла от контрольных значений в точке 1 составило 37,8%, в точке 5 – 67,5%, точке 6 – 41,5%, точке 9 – 34,5%, точке 11 – 35,9%, точке 16 – 16,0%, точке 19 – 41,6%. При этом в пробах из точек 5 и 19 наблюдался стимулирующий эффект, тогда как для проб из точек 1, 6, 9 и 11 было характерно замедление прироста хлорофилла. Таким образом, отклонение от контрольных значений на 50% было получено только для пробы из Нижнекальмиусского водохранилища (точка 5).

Так как достоверные отличия для коэффициента прироста численности клеток фитопланктона были зарегистрированы только в точках 9 и 11, то отклонения концентрации хлорофилла в других пробах не дают возможности утверждать о токсическом действии воды. Учитывая,

что отклонение содержания фотопигмента для данных мониторинговых точек не составило 50% и более, то пробы воды из данных точек также не обладают острым токсическим действием.

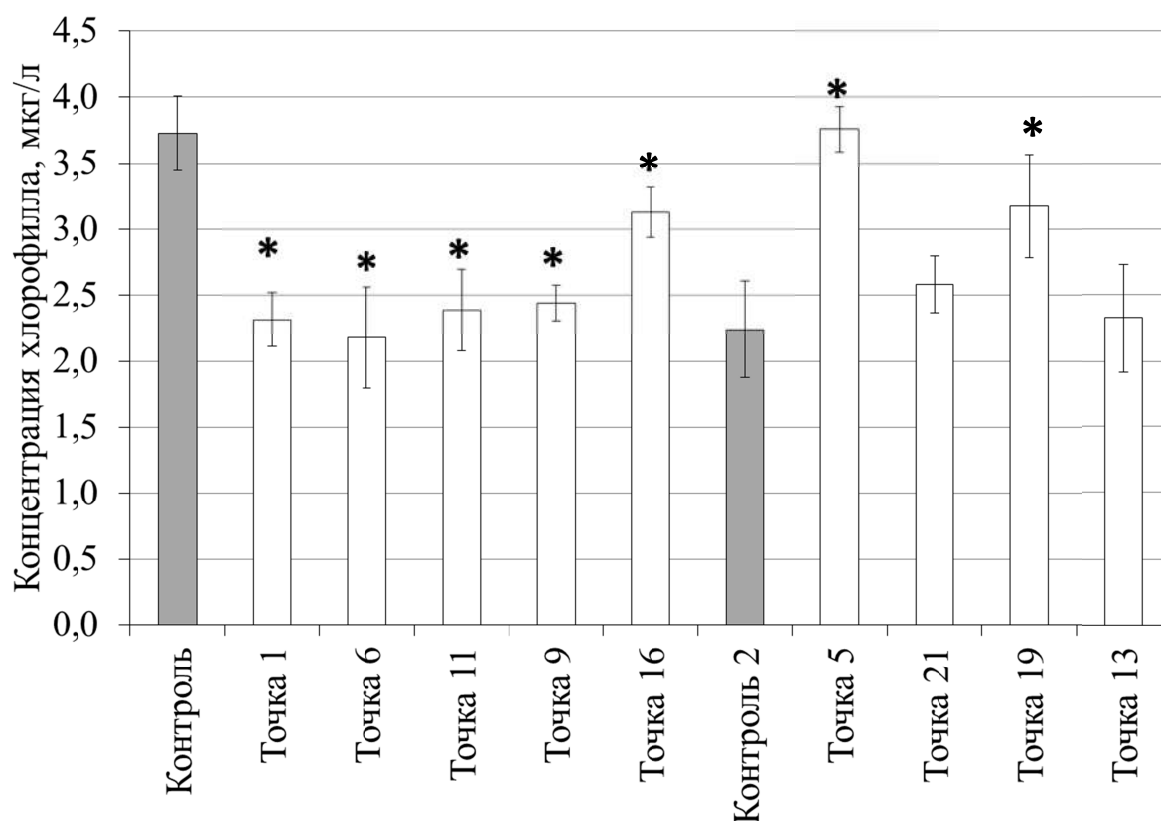


Рисунок 2.20 – Значения содержания хлорофилла в пробах культуры *Chlorella sorokiniana* через 24 часа биотестирования (\* – отличия от контроля достоверны ( $p < 0,05$ ))

Согласно полученным результатам для коэффициента прироста численности клеток культуры *Chlorella sorokiniana*, которые представлены на рисунке 2.2, возможным хроническим токсическим действием могли обладать пробы 1, 5, 6, 19 и 21. На рисунке 2.21 приведены результаты измерений содержания хлорофилла *a* в исследуемых пробах после 96 часов экспозиции.

Достоверных отличий от контрольных значений не наблюдали только для мониторинговой точки 16, тогда как для пробы из пруда парка им. А.С. Щербакова был характерен стимулирующий эффект. Для

остальных проб воды был получен угнетающий эффект, который выражался в замедлении нарастания содержания хлорофилла *a* в тест-культурах. Однако, не смотря на достоверные отличия от контрольных значений не для всех проб соблюдалось требование по 50-ти процентному отклонению – в пробах 1, 9, 11, 13 и 19. Отклонение в 50% было характерно только для проб 5, 6 и 21.

Таким образом, пробы, отобранные в Нижнекальмиусском водохранилище, пр. Ильича (точка 5) и пр. Дзержинского (точка 6), а также на сливе из пруда Алексеевский (точка 21) обладали хроническим токсическим действием. Негативные эффекты в мониторинговых точках водохранилища могут быть связаны с интенсивным разрастанием сине-зелёных водорослей в момент отбора проб, что также отмечалось ранее (рис. 2.7). Для данных точек были отмечены относительно высокие концентрации фотопигментов (рис. 2.6).

Также для мониторинговой точки наблюдали отклонения различных флуориметрических показателей, зарегистрированных с применением различных подходов к индуцированию флуоресценции. Так, при регистрации световых кривых отмечали сравнительно невысокие значения квантового выхода (рис. 2.9), а также более низкие показатели максимального квантового выхода и  $ETR(max)$  (рис. 2.15 а–с). При проведении ОЛР-теста для данной пробы был выявлен ряд параметров, которые значительно отличались от значений в остальных мониторинговых точках: наблюдали низкие значения параметров  $M_0$  и  $V_i$  (рис. 2.16 с и d соответственно), а также более высокие значения для  $\Psi_0$  и  $Area$  (рис. 2.17 а и d, соответственно). Для проб воды из пруда Алексеевский были характерны сравнительно низкие показатели квантового выхода флуоресценции при регистрации световых кривых (рис. 2.8 и 2.10). Кроме того, также как и для проб из водохранилища, были зарегистрированы низкие значения  $V_i$  и более высокие для  $Area$  (рис. 2.16 d и рис. 2.17 d соответственно).

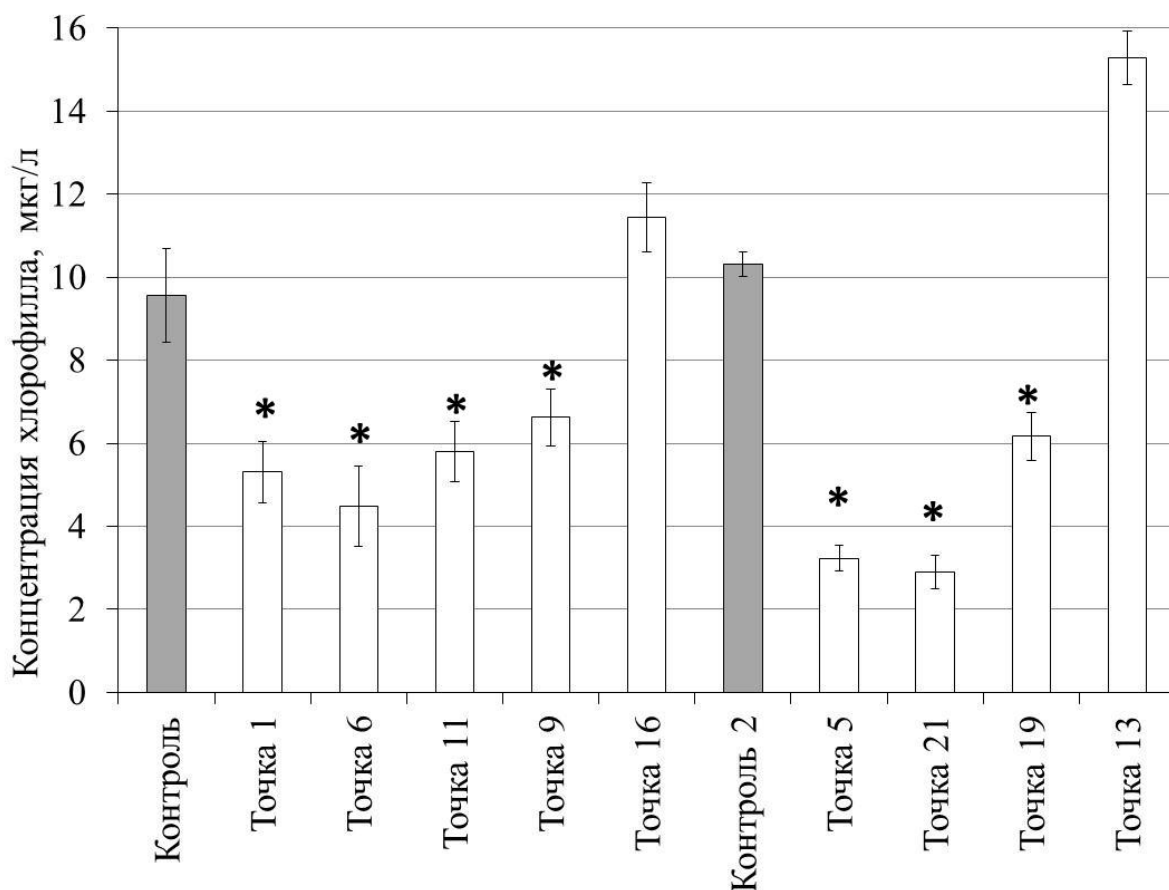


Рисунок 2.21 – Значения содержания хлорофилла в пробах культуры *Chlorella sorokiniana* через 96 часов биотестирования (\* – отличия от контроля достоверны ( $p < 0,05$ ))

С целью дополнительного осуществления контроля за состоянием клеток тест-культур при биотестировании выполняли регистрацию квантового выхода флуоресценции. После 24 часов экспозиции более низкие значения в сравнении с контролем были получены для проб из водохранилищ Нижнекальмиусское (точка 5) и Донецкое море (точка 19), фильтрат из других мониторинговых точек либо оказывал небольшое стимулирующее действие (1, 9, 11 и 16), либо не оказывал никакого действия вообще (точки 6, 13 и 21) (рис. 2.22). Однако, для всех исследуемых проб значения квантового выхода не выходили за пределы условной «физиологической» нормы. Проявление слабого

стимулирующего эффекта сопряжено с активным нарастанием численности клеток *Chlorella sorokiniana*, т.к. было неоднократно показано, что данные показатели пропорционально связаны между собой [151, 167].

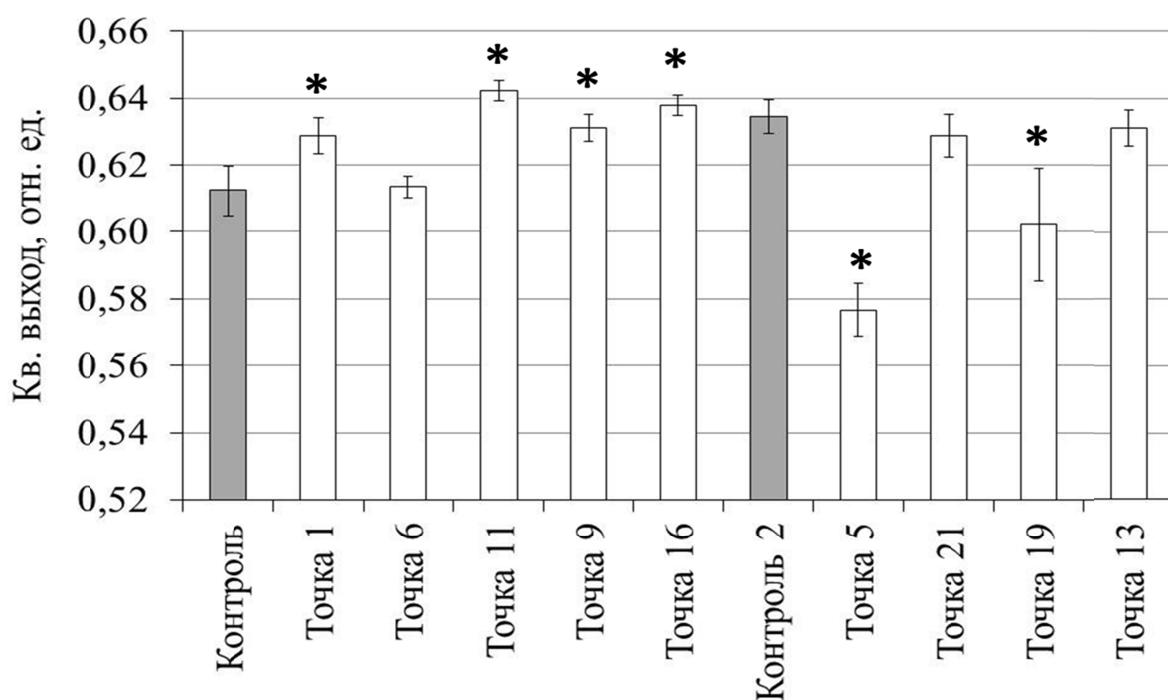


Рисунок 2.22. – Значения квантового выхода флуоресценции хлорофилла в пробах культуры *Chlorella sorokiniana* через 24 часа биотестирования (\* – отличия от контроля достоверны ( $p < 0,05$ ))

При оценке хронического действия проб воды (через 96 часов) было выявлено достоверное снижение квантового выхода флуоресценции для всех исследуемых тест-культур (рис. 2.23). Наиболее низкие значения данного параметра были получены для пробы из Нижнекальмиусского водохранилища (точка 6). Также как и при 24-х часовом воздействии, для всех исследуемых проб значения квантового выхода не выходили за пределы условной «физиологической» нормы. Стоит отметить, что наибольшие изменения данного показателя происходили в тех пробах

воды, для которых было выявлено хроническое токсическое действие на культуру *Chlorella sorokiniana*.

На основании полученных результатов и требований, приведенных в рекомендациях по биотестированию поверхностных вод [173], была составлена таблица, которая отражает степень токсического действия отдельных проб воды на исследуемые показатели тест-культуры (табл. 2.4).

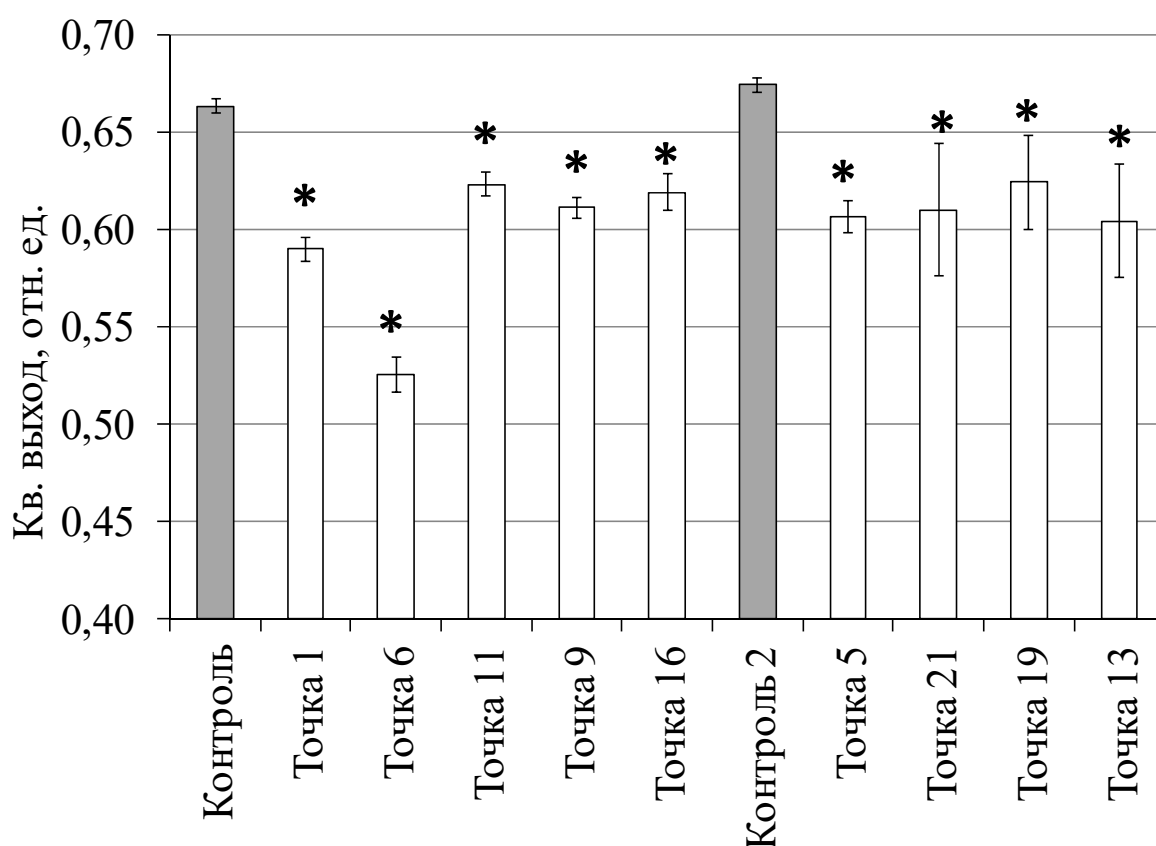


Рисунок 2.23 – Значения квантового выхода флуоресценции хлорофилла в пробах культуры *Chlorella sorokiniana* через 96 часов биотестирования (\* – отличия от контроля достоверны ( $p < 0,05$ ))

В таблице 2.4 как ОТД обозначено острое токсическое действие, как ХТД – хроническое токсическое действие. Знаком \* отражены достоверные отличия от контроля ( $p < 0,05$ ). Положительные и

отрицательные значения для отклонений от коэффициента прироста численности и концентрации хлорофилла указывают на стимулирующий или угнетающий эффект от исследуемой пробы воды. Жирным шрифтом выделены значения, которые отклоняются от контрольных значений коэффициента прироста численности на 25% и концентрации хлорофилла – на 50%.

Таблица 2.4 – Результаты биотестирования токсичности проб воды в отдельных мониторинговых точках на культуре *Chlorella sorokiniana*

Мониторинговая точка	Экспозиция, ч.	Отклонение от коэф-та прироста числ-ти, %	Конц. хл-ла, откл. от контроля, %	Токсическое действие
Контроль	24 часа	–	–	–
Т.1-Засядько		0,05	-37,8*	Нет ОТД
Т.6-Дзержинского		-15,2	-41,5*	Нет ОТД
Т.11-Куприна		<b>-50,1*</b>	-35,9*	Нет ОТД
Т.9-Дурная		<b>-35,8*</b>	-34,5*	Нет ОТД
Т.16-Молодежный		-21,4	-16,0*	Нет ОТД
Контроль 2		–	–	–
Т.5-Ильича		-10,0	<b>67,5*</b>	Нет ОТД
Т.21-Алексеевский		24,6	15,2	Нет ОТД
Т.19-Дон. море		-2,3	41,6*	Нет ОТД
Т.13-Щербакова		<b>-32,1</b>	3,7	Нет ОТД
Контроль	96 часов	–	–	–
Т.1-Засядько		<b>-38,6*</b>	-44,4*	Нет ХТД
Т.6-Дзержинского		<b>-36,5*</b>	<b>-53,1*</b>	ХТД
Т.11-Куприна		<b>-62,9*</b>	-39,2*	Нет ХТД
Т.9-Дурная		<b>-53,0*</b>	-30,7*	Нет ХТД
Т.16-Молодежный		1,8	19,7*	Нет ХТД
Контроль 2		–	–	–
Т.5-Ильича		<b>-69,3*</b>	<b>-68,6*</b>	ХТД
Т.21-Алексеевский		<b>-89,1*</b>	<b>-72,0*</b>	ХТД
Т.19-Дон. море		<b>-76,4*</b>	-40,2*	Нет ХТД
Т.13-Щербакова		<b>-27,6*</b>	48,2*	Нет ХТД

### 2.2.2 Регистрация световых кривых флуоресценции тест-культуры *Chlorella sorokiniana*

Световые кривые для каждой исследуемой пробы измеряли в трех повторностях, для каждой повторности отбирали новую квоту клеток тестовой культуры. Согласно полученным результатам производили определение величин максимального квантового выхода флуоресценции и максимального квантового выхода (ETR(max)), также, как и для мониторинговых измерений.

На рисунке 2.24 представлены световые кривые квантового выхода флуоресценции через 24 и 96 часов экспозиции.

После 24 часов биотестирования достоверные отличия квантового выхода от контрольных значений были получены только для пробы из Нижнекальмиусского водохранилища (точка 5, пр. Ильича) (рис. 2.24 с). Полученный результат согласуется с основными результатами биотестирования, где квантовый выход для данной пробы воды также был ниже контрольных значений (рис. 2.22). Для остальных исследуемых проб воды отклонений от контроля не наблюдали (рис. 2.24 а и с). Также стоит отметить форму световых кривых. Полученные значения квантового выхода практически не отклонялись от подгонки согласно модели фотосинтеза Эйлера и Питерса [151, 162–167]. Это в значительной мере отличает данные результаты от таковых при измерении проб природного фитопланктона, где световые кривые часто имели «неправильную» форму (рис. 2.8–2.14). Такие отличия связаны с отсутствием дополнительных источников излучения (разрушенных клеток фитопланктона различных видов, растворенных гуминовых кислот, растворенной органики) в пробах монокультуры, что в значительной мере снижает погрешности измерений. После 96 часов экспозиции было зарегистрировано снижение квантового выхода флуоресценции в отдельных пробах воды. Так, в пробах около

вентиляционного ствола шахты им. А.Ф. Засядько (точка 1), в Нижнекальмиусском водохранилище (точка 6), р. Дурная (точка 9) и месте ее впадения в р. Кальмиус (точка 11), а также в пруду Молодежный (точка 16) были получены достоверные отличия квантового выхода (рис. 2.24 b). Для остальных проб отличий от контрольных значений выявлено не было (рис. 2.24 d). Стоит отметить, что при увеличении времени экспозиции возрастала мера разброса полученных значений, что может быть обусловлено более высокими концентрациями хлорофилла. Однако световые кривые имели заданную форму, а показатели квантового выхода флуоресценции для всех исследуемых проб не выходили за пределы нормы в течение всего времени биотестирования.

Результаты, полученные при измерении скорости электронного транспорта, соответствовали изменениям квантового выхода. Так, более низкие значения ETR были получены для пробы из мониторинговой точки 5 (рис. 2.25 c). Также при интенсивности света  $764 \text{ мкмоль квант м}^{-2} \text{ с}^{-1}$  более низкие значения ETR регистрировали для мониторинговой точки 6 (рис. 2.25 a). Однако, также были отмечены более высокие значения скорости транспорта в точках 1, 9, 11 и 16, но достоверные отличия были получены только при максимальной интенсивности света –  $764 \text{ мкмоль квант м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ , где разница ETR между контролем и опытными культурами достигала 10% (рис. 2.25 a). Такое возрастание может быть обусловлено интенсификацией ростовых процессов на начальных стадиях эксперимента.

После 96 часов биотестирования было получено значительное снижение скорости транспорта электронов для пяти исследуемых проб – мониторинговые точки 1, 6, 9, 11 и 16 (рис. 2.25 b), также, как и для квантового выхода для данных точек при таком же времени экспозиции (рис. 2.25 b).

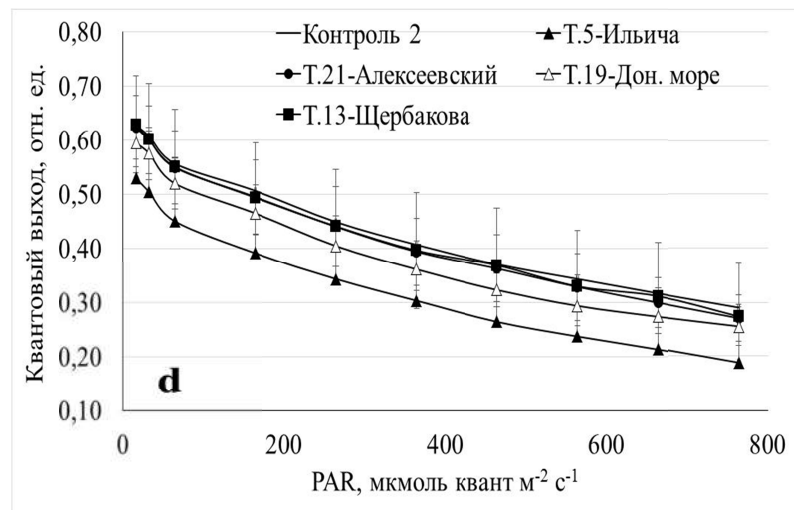
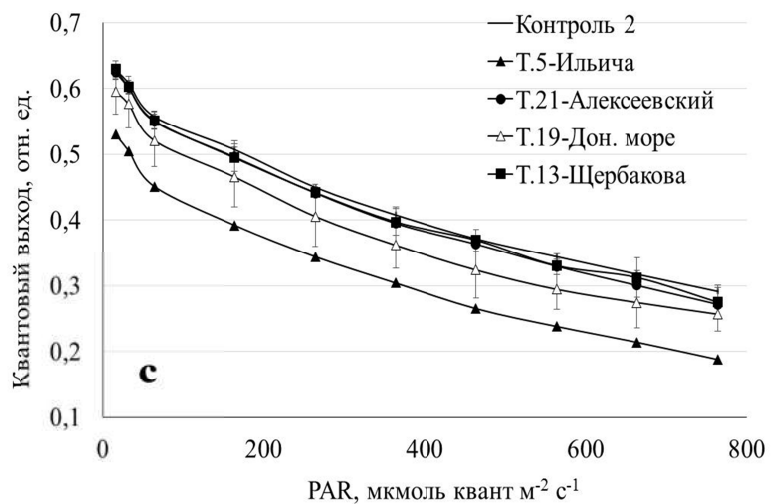
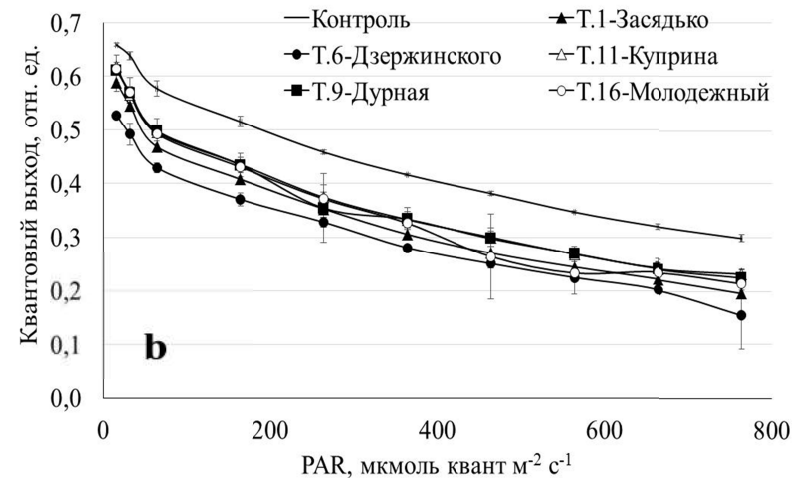
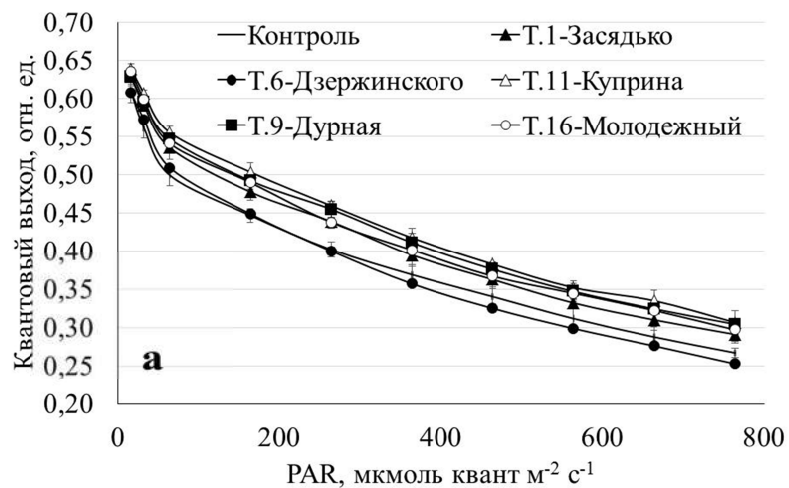


Рисунок 2.24 – Световые кривые квантового выхода флуоресценции хлорофилла при биотестировании:  
а и с – после 24 часов экспозиции; б и д – после 96 часов экспозиции

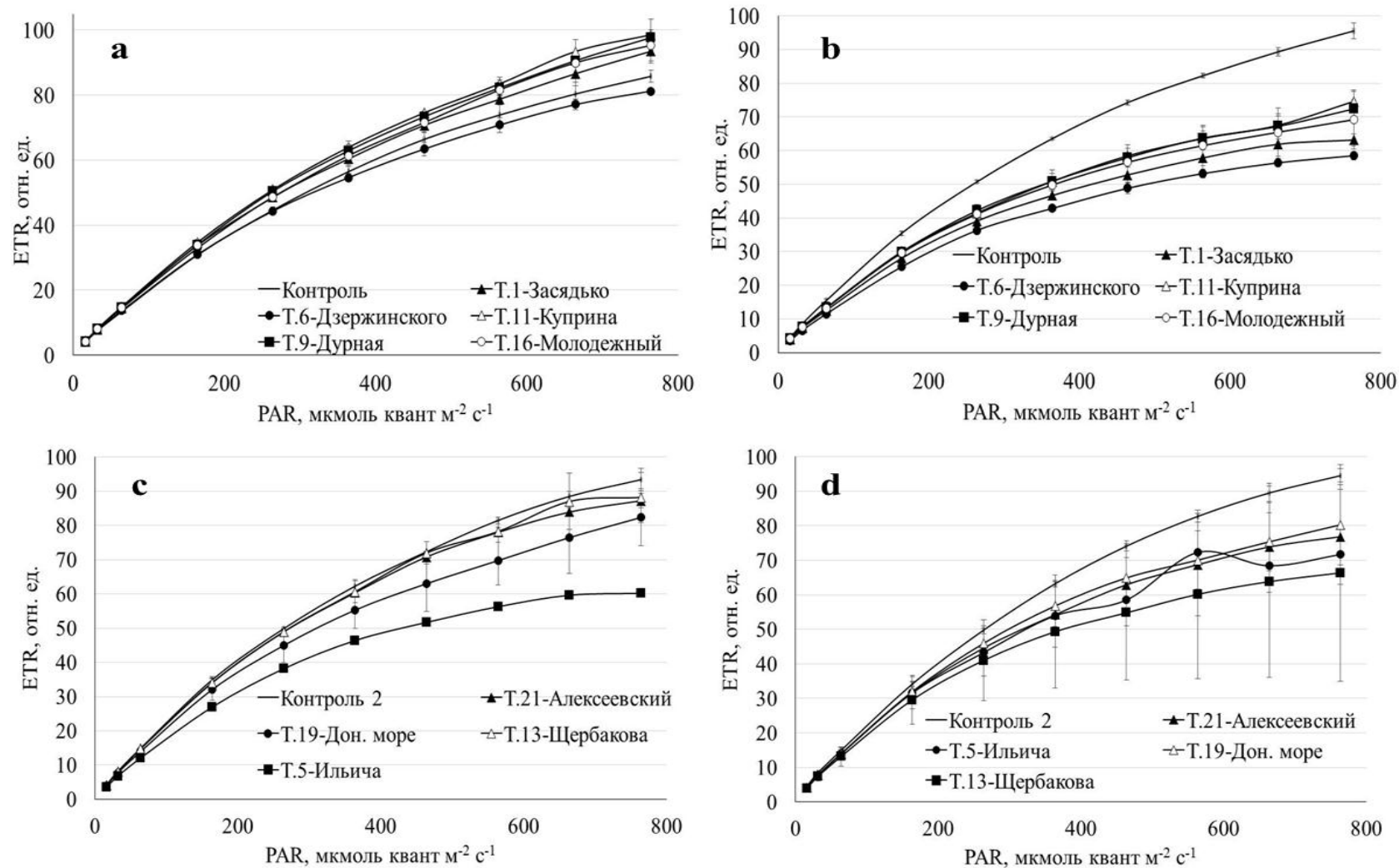


Рисунок 2.25 – Световые кривые скорости электронного транспорта (ETR) при биотестировании:

а и с – после 24 часов экспозиции; b и d – после 96 часов экспозиции

При этом достоверные отличия наблюдались уже до включения источника актиничного света, т.е. при интенсивности света менее  $200 \text{ мкмоль квант м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ , что свидетельствует о значительном замедлении функционирования электрон-транспортной цепи фотосистемы II.

Для результатов измерений проб из мониторинговых точек 13 и 21 были характерны высокие значения меры разброса величин. Несмотря на то, что средние значения ETR были значительно ниже, чем контрольные, достоверных отличий от контрольной выборки получить не удалось (рис. 2.25 d). Однако, для мониторинговых точек водохранилищ – Нижнекальмиусского (точка 5) и Донецкое море (точка 19) были получены более низкие значения скорости транспорта, которые достоверно отличались от контроля.

На основании результатов измерений световых кривых находили максимальные значения квантового выхода флуоресценции и скорости электронного транспорта (ETR(max)), которые определяли для каждой повторности отдельно, а затем находили усредненное значение для исследуемой мониторинговой точки и контрольных проб.

Стоит отметить, что показатель ETR(max) для всех исследуемых проб не превышал значений 100 отн. ед. независимо от длительности экспозиции, а квантовый выход изменялся в пределах от 0,7 до 0,5 отн. ед. (рис. 2.26 и 2.27). Достоверные отличия от контрольных значений для показателя ETR(max) после 24 часов биотестирования были получены для точки 5. В целом, показатели максимального электронного транспорта согласуются со световыми кривыми, что не всегда соблюдалось для природных проб фитопланктона, где максимальную скорость транспорта регистрировали на более низких интенсивностях света (например, рис. 2.8 и 2.11).

Показатели ETR(max) для точек 9, 11 и 16 превышали контрольные значения. Однако по данным отклонениям невозможно сделать обоснованные выводы о некотором стимулирующем действии данных

проб воды на культуру *Chlorella sorokiniana*, учитывая также тот факт, что другие показатели флуоресценции и численности клеток не отражали подобного воздействия.

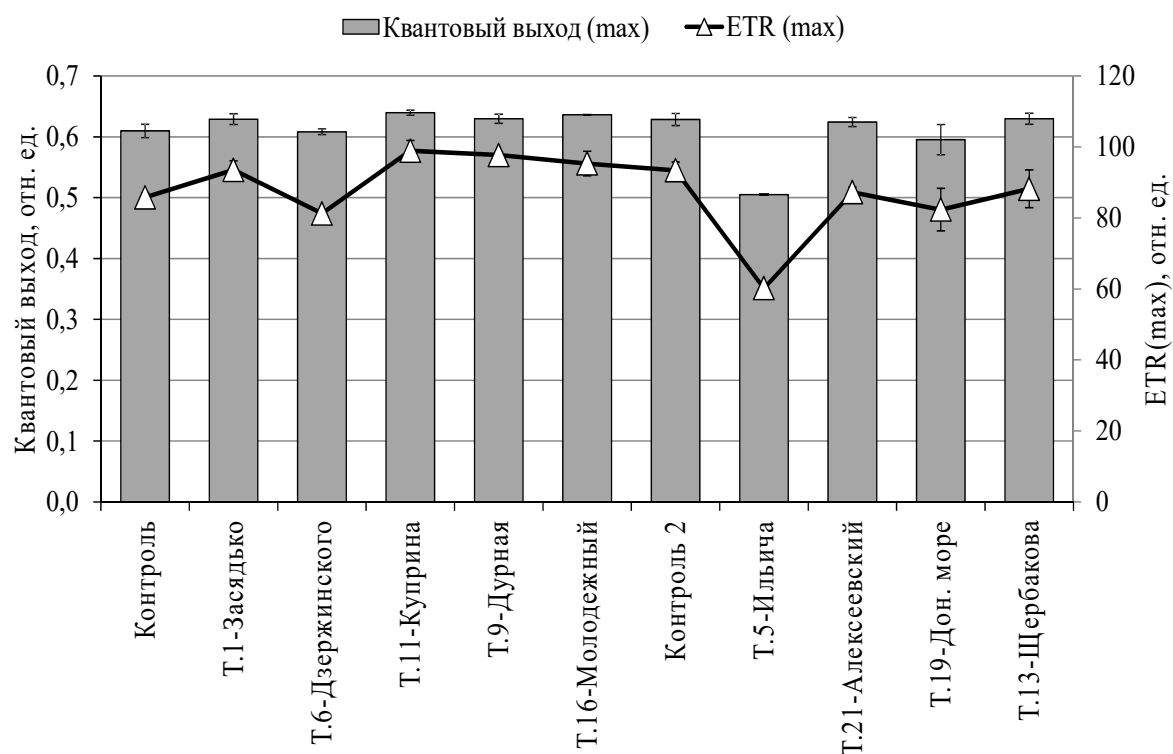


Рисунок 2.26 – Показатели максимального квантового выхода флуоресценции и электронного транспорта (ETR(max)) для клеток *Chlorella sorokiniana* после 24 часов экспозиции

Также стоит отметить сравнительно невысокие квантовые выходы всех исследуемых проб. Но при регистрации значений квантового выхода с помощью одиночной насыщающей вспышки были получены сходные значения данного показателя (рис. 2.22 и 2.23). Значения максимального квантового выхода для мониторинговой точки 5 также были ниже контрольных (рис. 2.26), но не опускались ниже значения 0,5. Для остальных мониторинговых точек достоверных отличий от контроля для квантового выхода не наблюдали.

Более показательные результаты были получены после 96-часовой экспозиции (рис. 2.27). Максимальный квантовый выход для контрольных проб возрастал до значений, близких к 0,7, которые считаются максимальными для данных организмов, тогда как для всех мониторинговых точек данный показатель был достоверно ниже.

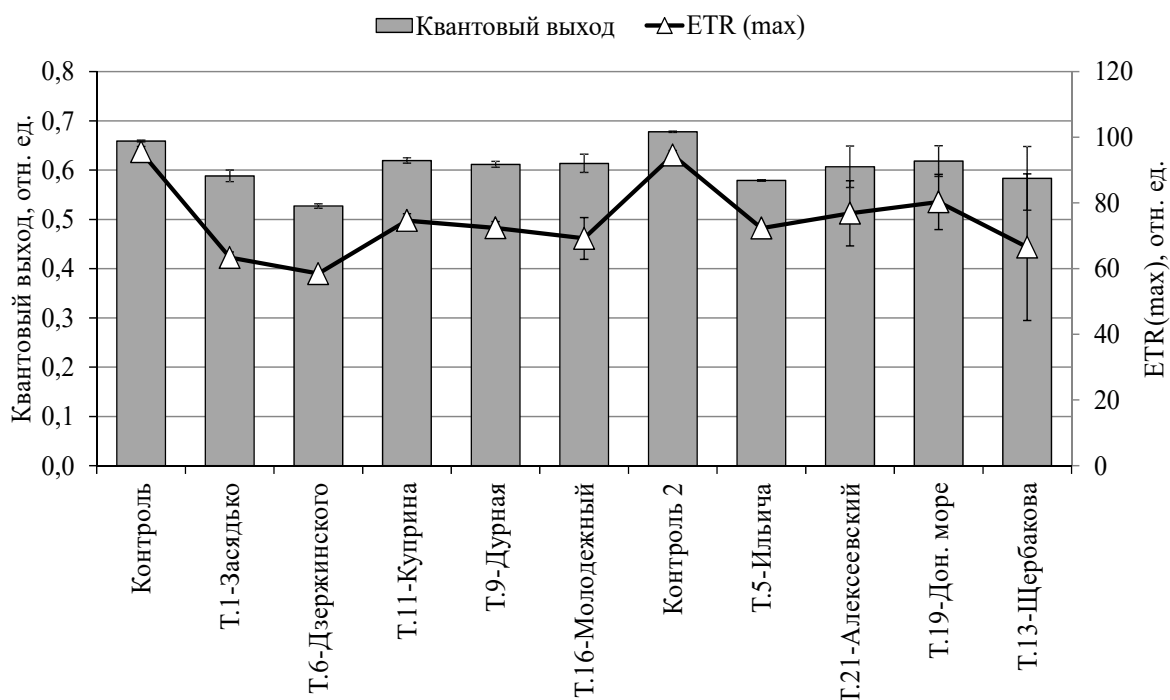


Рисунок 2.27 – Показатели максимального квантового выхода флуоресценции и электронного транспорта (ETR(max)) для клеток *Chlorella sorokiniana* после 96 часов экспозиции

Наиболее низкие значения были получены для точки 6, где квантовый выход снизился в сравнении с результатами 24-часовой экспозиции. Данное утверждение справедливо и для ETR(max) в данных пробах воды. Также низкие значения ETR(max) наблюдали и для точки 1. При проведении мониторинговых измерений в точке 1 не было зарегистрировано сравнительно низких значений для квантового выхода и ETR(max) для всех трех групп фитопланктона (рис. 2.15). Однако для

мониторинговых точек 5 и 6 было зафиксировано значительное снижение флуориметрических показателей. Заключение о хронической токсичности проб из мониторинговой точки 6 (табл. 2.4) позволяет сделать заключение об относительно высокой степени загрязнения данного участка русла реки Кальмиус. Кроме того, данная мониторинговая точка, а также точка 5, для которой также определяли ухудшение показателей флуоресценции и хроническую токсичность для тест-культуры фитопланктона, расположены в непосредственной близости к рекреационным зонам побережья Нижнекальмиусского водохранилища (Шеффилдский парк и т.д.).

Для мониторинговых точек 13, 19 и 21 были характерны значительные отклонения от средних значений, однако данные показатели также были ниже контрольных (рис. 2.27).

### **2.2.3 Регистрация кривых индукции флуоресценции тест-культуры *Chlorella sorokiniana***

Для оценки показателей флуоресценции на основании ОЛР-теста были зарегистрированы кривые индукции флуоресценции хлорофилла (кривые ИФХ или КИФХ). За 30 минут до записи кривых индукции пробы убирали от источника яркого освещения и помещали в затемненное место для темновой адаптации. Поэтому длительную выдержку непосредственно перед измерениями кривых не применяли.

Для каждой пробы выполняли не менее 5 измерений КИФХ. Поскольку для каждой мониторинговой точки при биотестировании отводили по три экспериментальные колбы, то получали выборки, состоящие не менее чем из 15 измерений.

Во время биотестирования было выявлено 10 показательных тест-функций, не зависящих от длительности экспозиции. Выполняли определение

следующих тест-функций: базовые показатели флуоресценции –  $F_0$ ,  $F_m$  и  $\Phi_0 = F_v/F_m$ ; параметры, отражающие функционирование переносчиков электронов фотосистемы II –  $M_0$ ,  $V_i$ ,  $V_j$  и  $Area$ ; параметры эффективности работы фотосинтетического аппарата –  $\Psi_0$ ,  $\Phi_{E_0}$  и  $PI$ . Также для биотестирования хронической токсичности проб было определено еще две тест-функции:  $t_{F_m}$  и  $V_k$ . Наибольшее внимание было уделено параметрам, которые являлись показательными, как при биотестировании острой, так и хронической токсичности проб воды.

Результаты определения параметров КИФХ изображены на рисунках 2.28–2.30. Достоверные отличия для базовых параметров флуоресценции ( $F_0$  и  $F_m$ ) были получены для мониторинговых точек водохранилищ (Нижекальмиусского (точки 5 и 6) и Донецкое море (точка 19)), а также для реки Дурная (точка 9), реки Кальмиус (точка 11) и пруда Молодежный (точка 16) (рис. 2.28 а). При этом только для точек 5 и 19 было зафиксировано превышение контрольных значений, тогда как для остальных проб были характерны более низкие показатели. Поскольку данные параметры являются основой для определения содержания хлорофилла в пробах воды, то наблюдалась четкая взаимосвязь между данными показателями (рис. 2.20).

Для всех исследуемых проб были получены высокие показатели квантового выхода флуоресценции (не менее 0,56 отн. ед.) (рис. 2.28 б). Достоверные отличия от контрольных значений были зарегистрированы только для проб из мониторинговых точек 1, 11 и 16, где квантовый выход был выше. Таким образом, видимых ухудшений состояния клеток тестовой культуры по показателю квантового выхода выявлено не было.

Также была выполнена оценка интенсивностей переменной флуоресценции во время отдельных фаз ОЛР кривых. Так, относительные величины переменной флуоресценции во время фаз I и J ( $V_i$  и  $V_j$  соответственно) были достоверно ниже контрольных значений для точек 1,

11, 16 и 19 (рис. 2.28 с и d). Также достоверные отличия были получены для показателя  $V_j$  в точке 6 (рис. 2.28 d). Параметр  $V_j$  отражает количество закрытых реакционных центров фотосистемы II по отношению к общему числу активных центров. Таким образом, для клеток фитопланктона в пробах из точек 1, 11, 16 и 19 было характерно большее число открытых реакционных центров во время регистрации КИФХ. Это также объясняет более высокие значения квантового выхода для данных проб, т.е. эффективность передачи энергии возбуждения для данных тест-культур была выше, в результате чего центры открывались быстрее. При этом стоит отметить, что максимальная скорость электронного транспорта при этом достоверно не возрастала (рис. 2.26). Следовательно, невозможно точно утверждать об увеличении эффективности передачи энергии. Принимая во внимание исследования по оценке флуориметрических параметров природных проб воды, такой результат возможен при снижении общей емкости пула электронных переносчиков и уменьшении способности фотосистемы I окислять пул пластохинонов. В данном случае усиление эффективности передачи – это компенсаторный механизм, который позволяет нивелировать негативные изменения на различных участках электрон-транспортной цепи. Для проверки данного предположения необходимо оценить параметры  $M_0$ ,  $V_i$  и  $Area$ .

Способность фотосистемы I окислять пластохиноновый пул (параметр  $V_i$ ) была достоверно ниже контрольных значений (рис. 2.28 d). Если рассматривать электрон-транспортную цепь между фотосистемами II и I в виде общепринятой Z-схемы, то реакции по передаче электронов из пуля пластохинонов ( $PQH_2$ ) на акцепторы фотосистемы I являются «узким местом», т.е. наиболее длительными в сравнении с другими реакциями в электрон-транспортной цепи [151]. Таким образом, снижение  $V_i$  указывает на еще большее замедление данной стадии передачи световой энергии возбуждения.

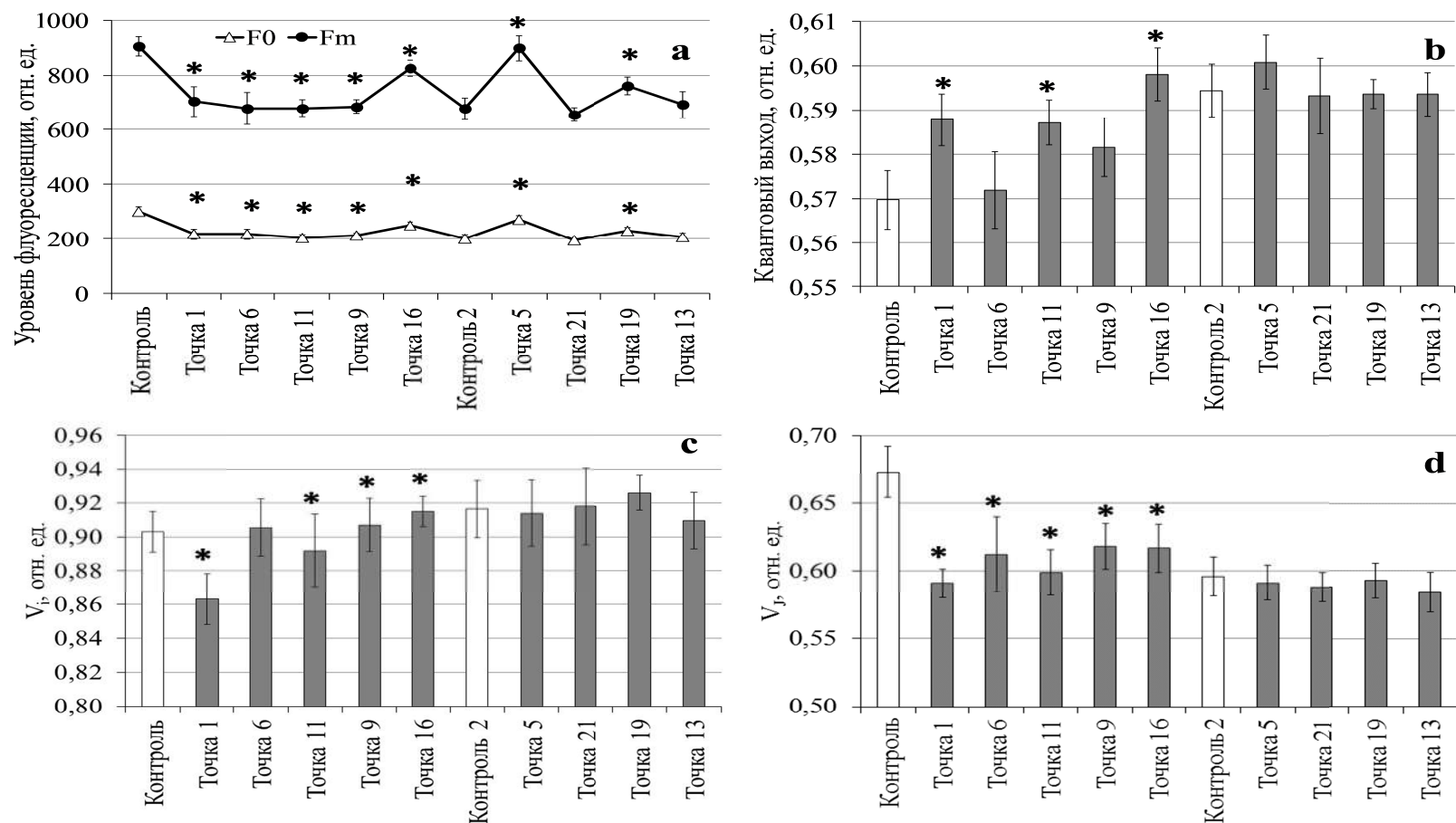


Рисунок 2.28 – Некоторые параметры ОЛР-кривых после 24 ч. экспозиции: а – уровни минимальной ( $F_0$ ) и максимальной ( $F_m$ ) флуоресценции; б – квантовый выход флуоресценции ( $F_v/F_m$ ); в – относительная величина переменной флуоресценции во время фазы I ( $V_i$ ); г – относительная величина переменной флуоресценции во время фазы J ( $V_j$ )

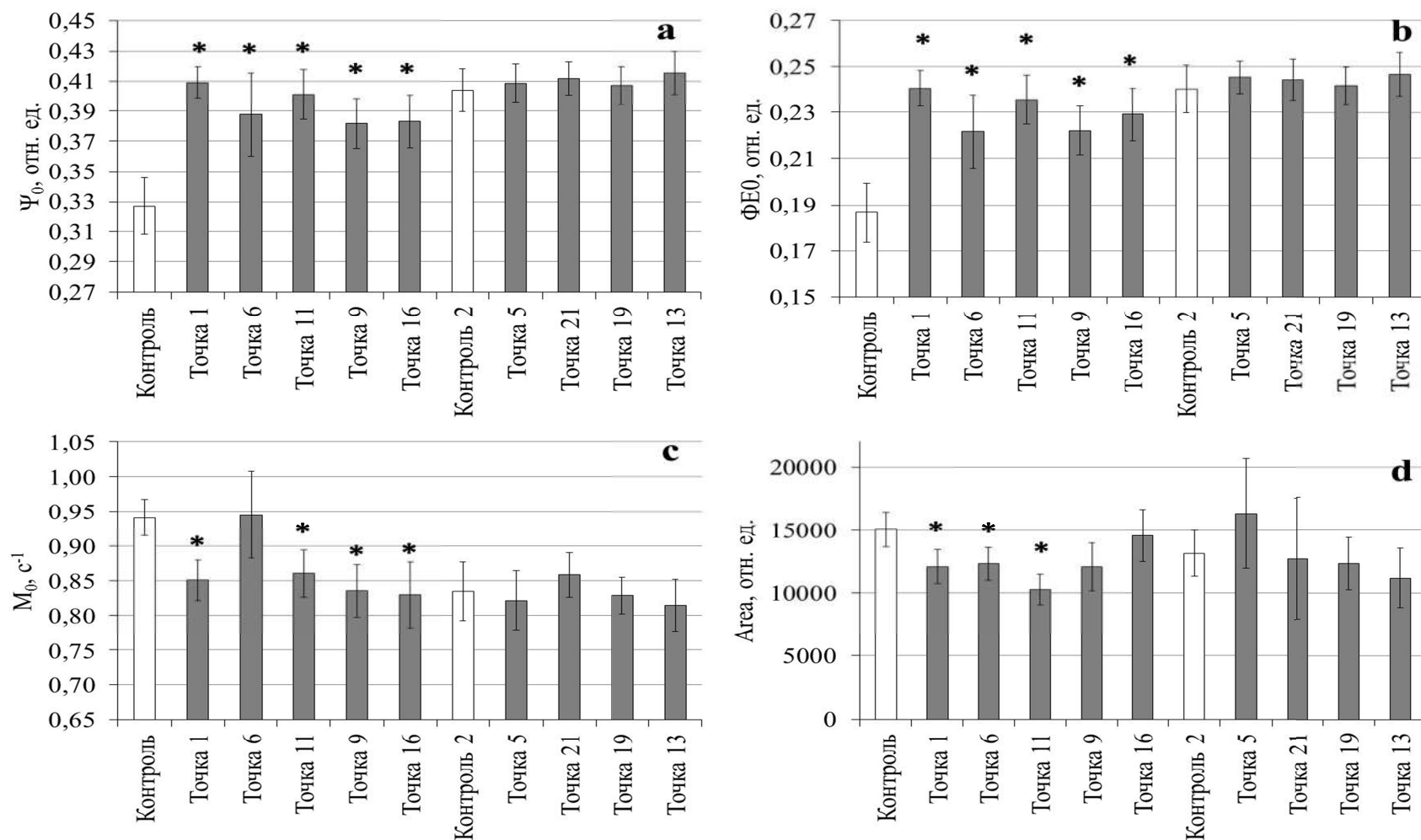


Рисунок 2.29 – Некоторые параметры ОЛР-кривых после 24 ч. экспозиции: а – вероятность транспорта электронов за пределы  $Q_a^-$  ( $\Psi_0$ ); б – квантовая эффективность переноса электронов от  $Q_a^-$  ( $\Phi_{E_0}$ ); в – показатель скорости закрывания реакционных центров фотосистемы II ( $M_0$ ); д – площадь над кривой индукции флуоресценции (Area)

Важным с точки зрения подтверждения результатов вычислений параметра  $V_j$  является показатель  $M_0$ . С одной стороны данный параметр отражает скорость закрывания реакционных центров фотосистемы II, с другой – считается, что  $M_0$  отражает максимальную скорость восстановления  $Q_a$  [151–154]. Согласно полученным данным, значения  $M_0$  были достоверно ниже контрольных значений для точек 1, 9, 11 и 16 (рис. 2.29 с). Таким образом, скорость закрывания реакционных центров была выше, но при этом скорость восстановления  $Q_a$ , а, следовательно, и возможность его окисления последующими переносчиками, была ниже. При этом также было отмечено снижение общего пула активных переносчиков (параметр *Area*) для точек 1, 6 и 11 (рис. 2.29 d). Увеличение скорости закрывания реакционных центров может быть связано с более низким порогом энергии активации реакционных центров в сравнении с клетками тест-культуры для других проб воды, что приводило к закрыванию реакционных центров при более низких интенсивностях действующего света, когда реакционные центры клеток фитопланктона из других проб еще оставались открытыми. Также данное предположение объясняет более высокие скорости максимального электронного транспорта в точках 1, 11, 16 и 19.

После 24 часов биотестирования для мониторинговых точек 1, 6, 9 и 11 было зафиксировано снижение кинетики электронной передачи на отдельных участках электрон-транспортной цепи, а именно для первичного акцептора электронов ( $Q_a$ ) и пула пластохинонов ( $PQH_2$ ), что происходило на фоне общего снижения количества активных электронных переносчиков. Следовательно, не смотря на то, что согласно стандартной методике токсического действия данных проб на тест-культуру выявлено не было, наблюдали снижение кинетики электронной передачи на уровне фотосистем II и I. При этом было зарегистрировано увеличение скорости закрывания реакционных центров фотосистемы II, а также увеличение

числа открытых центров после действия света высокой интенсивности. Возможно, что ускорение работы реакционных центров связано с работой промежуточных переносчиков (например, феофитина или вторичного акцептора электронов ( $Q_b$ )), что может объяснять более высокие значения для  $V_j$ , поскольку другие параметры, отражающие функционирование акцепторов были ниже контрольных значений. Параметров, которые могли бы качественно или количественно описать работу феофитина, при обработке КИФХ получено не было. Однако, энергетические параметры  $\Psi_0$  и  $\Phi_{E_0}$  отражают функционирование переносчиков электрон-транспортной цепи (ЭТЦ) после  $Q_a$ .

Так, эффективность передачи электрона по цепочке после  $Q_a$  (параметр  $\Psi_0$ ) была значительно выше, чем в контрольной группе, для точек 1, 6, 9, 11 и 16 (рис. 2.30 а). Это может свидетельствовать об ускорении перехода вторичного акцептора электронов из  $Q_b$ -сайта в  $PQH_2$ . Также возможны изменения в функционировании цитохромного комплекса (цитохром- $b_6f$  комплекса), поскольку согласно результатам измерений  $M_0$  и  $V_i$ , окисление пула  $PQH_2$ , а также функционирование пластоцианина и первичного акцептора фотосистемы I ( $A_0$ ) замедлялись, т.е. нет других возможных вариантов по определению участков, на которых эффективность передачи электрона возрастала, кроме  $Q_b$  и цитохром- $b_6f$  комплекса. В пользу данного утверждения также свидетельствует повышение показателя квантовой эффективности переноса электронов от  $Q_a^-$  (параметр  $\Phi_{E_0}$ ) для указанных мониторинговых точек (рис. 2.30 б). Следовательно, передача электрона на  $Q_b$  выполнялась с большей эффективностью. Данных, подтверждающих изменения в работе цитохром- $b_6f$  комплекса, получено не было, а значит на основании имеющихся данных можно сделать предположение об увеличении

эффективности функционирования только вторичного акцептора электронов.

Таким образом, предположение о компенсации снижения эффективности передачи энергии возбуждения на отдельных участках ЭТЦ ( $Q_a$  и  $PQH_2$ ) за счет повышения эффективности функционирования других компонентов цепи (реакционные центры и  $Q_b$ ) можно считать справедливым.

Показатель функциональной активности фотосистемы II для точек 1, 6, 9 и 11 также был выше, чем в контрольной группе (рис. 2.30). Стоит отметить, что уровень индекса производительности находился в одинаковых пределах для большинства проб, при этом значения для контрольной группы «Контроль» были наименьшими.

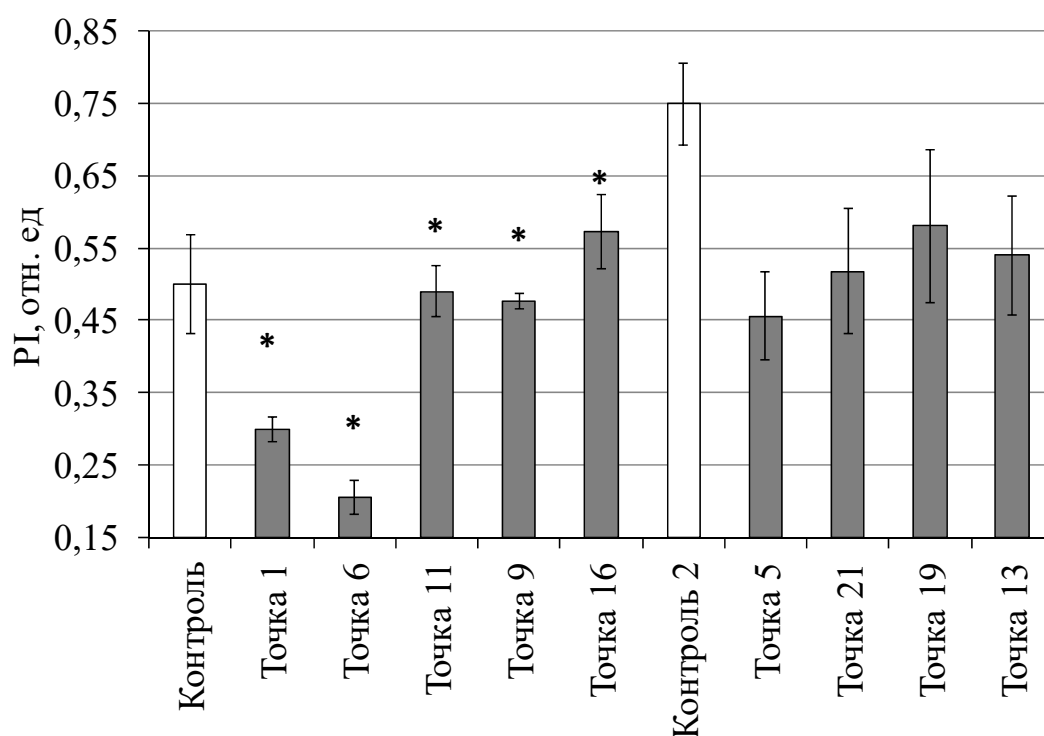


Рисунок 2.30 – Индекс производительности (PI) для различных проб при биотестировании после 24 ч. экспозиции

После 24 часов экспозиции не наблюдали угнетения клеток *Chlorella sorokiniana*, что согласуется с результатами световых кривых флуоресценции и основной методикой биотестирования. Однако, для отдельных проб фитопланктона наблюдали достоверные отклонения параметров флуоресценции, характеризующих функционирование отдельных электронных переносчиков ЭТЦ фотосистемы II.

При оценке параметров КИФХ обращали внимание на их соответствие результатам стандартной методики биотестирования, поскольку было выявлено хроническое токсическое действие отдельных проб воды. В данном контексте наибольший интерес представляет обоснование соответствия параметров флуоресценции после 96 часов экспозиции, полученных при регистрации КИФХ и световых кривых, с результатами биотестирования, а также выявление более «конкретных» изменений в функционировании фотосинтетического аппарата клеток тест-культуры. Это позволит расширить возможности существующего метода биотестирования с применением культур фитопланктона. При оценке хронического токсического действия проб воды было выявлено достоверное снижение базовых параметров флуоресценции ( $F_0$  и  $F_m$ ) для 7 мониторинговых точек – точки 1, 5, 6, 9, 11, 19 и 21 (рис. 2.31 а). Значения  $F_0$  и  $F_m$  для точек 13 и 16 не отличались от контрольных. Значения квантового выхода были достоверно ниже контрольных значений во всех исследуемых пробах кроме точек 5 и 16 (рис. 2.31 б). Средние значения квантового выхода в точке 5 были также ниже, чем в контрольных пробах, однако установить достоверность отличий не удалось ввиду малой экспериментальной выборки. Следует отметить, что значения данного параметра не были ниже 0,5 отн. ед. для всех исследуемых проб. Полученные значения совпадают с результатами измерений квантового выхода с помощью РАМ-метода (рис. 2.24), кроме мониторинговой точки 16, для которой были получены более низкие

значения. Кроме того, данный результат совпадает с максимальным квантовым выходом, полученным с помощью световых кривых флуоресценции (рис. 2.27). При этом показатели квантового выхода для мониторинговых точек пруд Алексеевский, водохранилище Донецкое море и пруд в парке им. А.С. Щербакова имели меньшую меру разброса в сравнении с квантовым выходом, вычисленным по ОЛР-кривым. Скорость закрывания реакционных центров фотосистемы II (параметр  $M_0$ ) была достоверно выше для проб из мониторинговых точек 1, 6 и 13 (рис. 2.31 с). Изменение параметра  $M_0$  для точек 1 и 6 сохранялось после 24 часовой экспозиции, тогда как для точек 9, 11 и 16 данные изменения исчезли, что может быть связано с процессами адаптации клеток фитопланктона к составу фильтрата проб воды.

При 96 часовой экспозиции была получена дополнительная тест-функция – параметр  $t_{F_m}$ , отражающий время, необходимое для достижения уровня максимальной флуоресценции ( $F_m$  или пика  $P$  на КИФХ). Достоверное снижение значений  $t_{F_m}$  в сравнении с контролем были получены для всех исследуемых проб кроме точек 1, 6 и 21 (рис. 2.31 d). Снижение времени выхода на максимум может быть связано со снижением интенсивности сигнала флуоресценции, изменением крутизны КИФХ и т.п., т.к. параметр  $Area$  также достоверно снижался (рис. 2.33 d). Также причиной изменений значений  $t_{F_m}$  может служить изменение времени протекания отдельных фаз переходов (например,  $O-J$  или  $I-P$ ) на индукционной кривой, либо перераспределение данных времен. Однако, сделать однозначные выводы по данному показателю затруднительно.

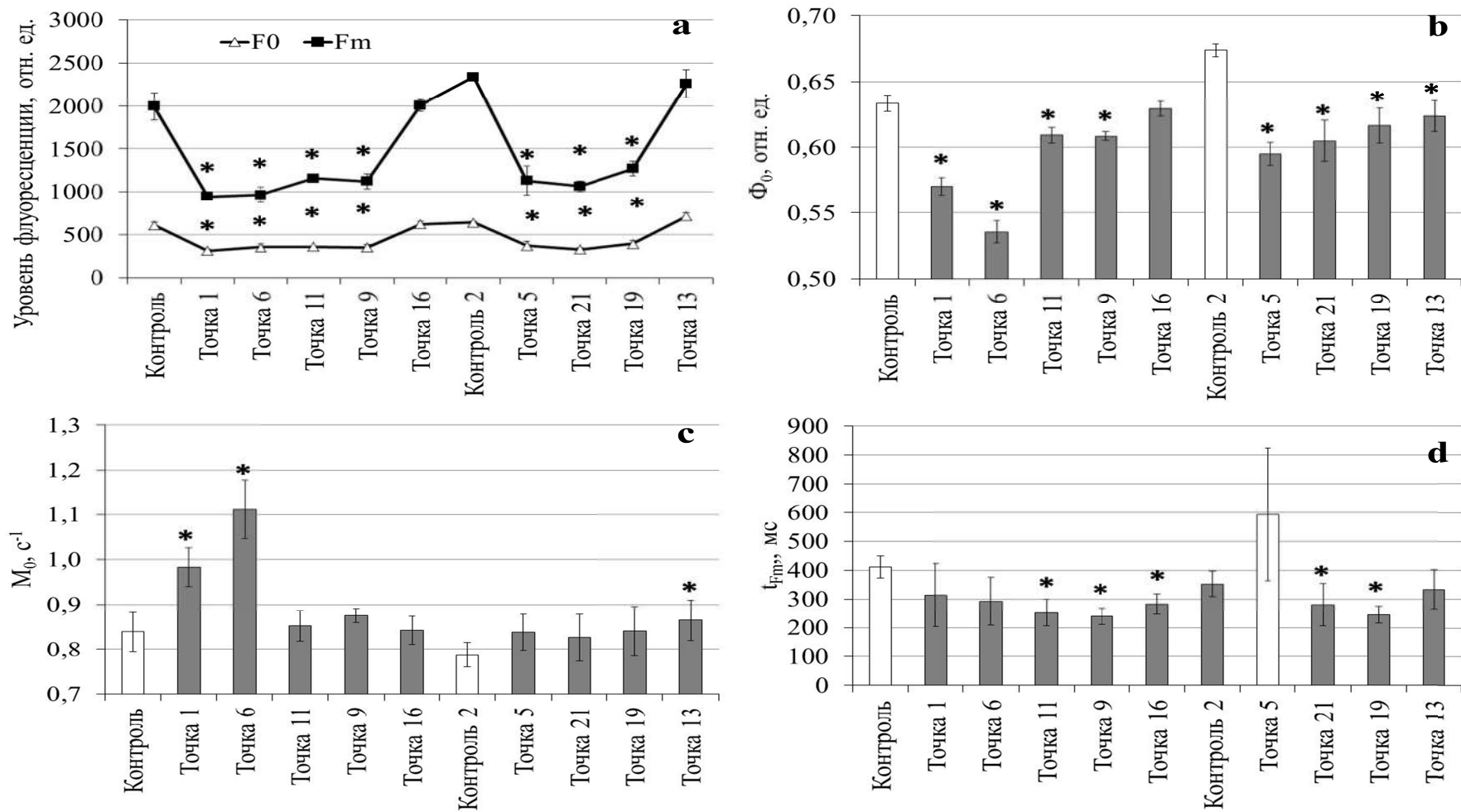


Рисунок 2.31 – Параметры ОЛР-кривых после 96 ч. экспозиции: а – уровни минимальной ( $F_0$ ) и максимальной ( $F_m$ ) флуоресценции; б – квантовый выход флуоресценции ( $\Phi_0$ ); в – скорость закрывания реакционных центров фотосистемы II ( $M_0$ ); д – время, необходимое для достижения максимального уровня флуоресценции ( $t_{F_m}$ )

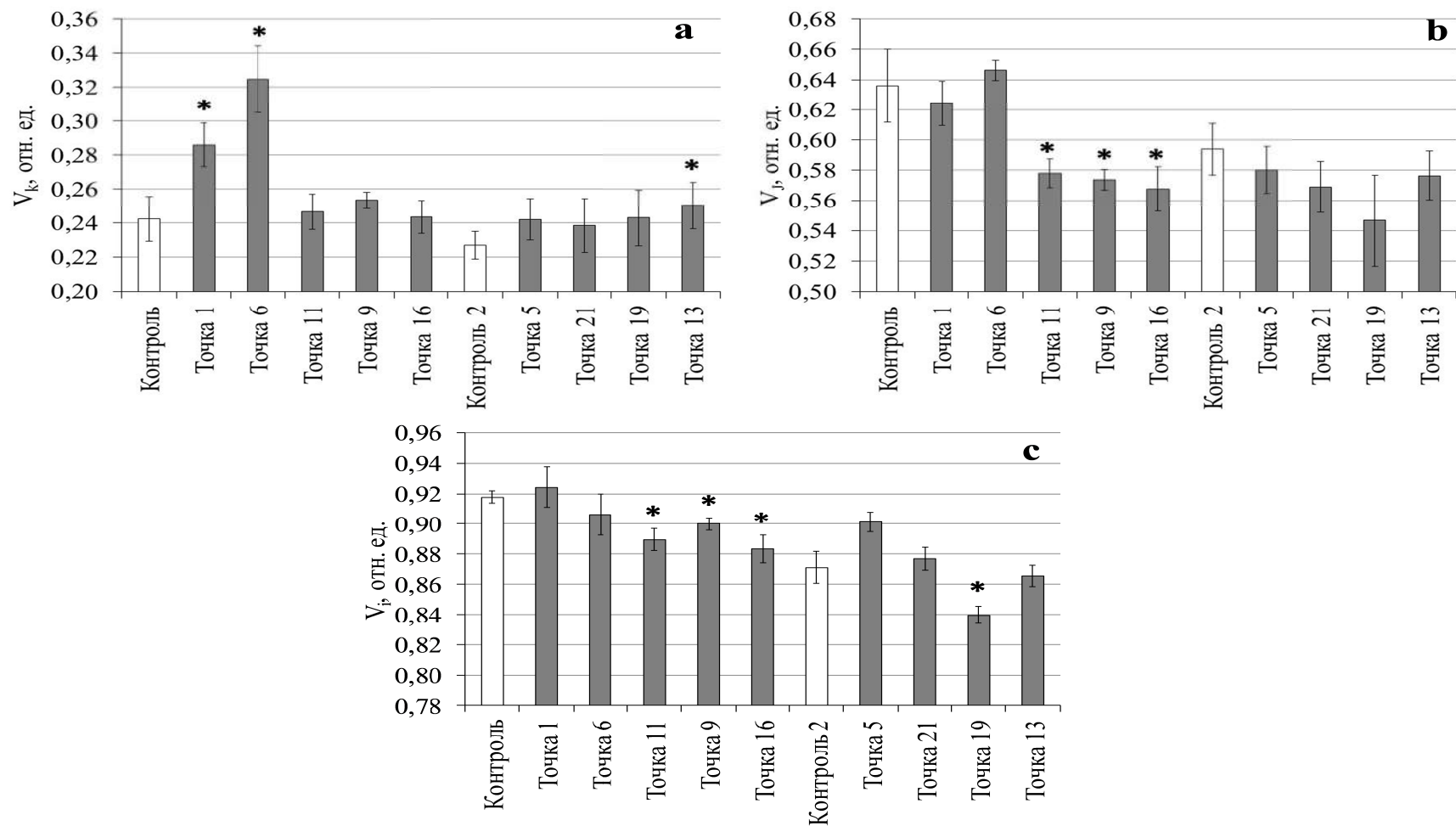


Рисунок 2.32 – Некоторые параметры ОЛР-кривых после 96 ч. экспозиции: а – относительная величина переменной флуоресценции во время фазы К ( $V_k$ ); б – относительная величина переменной флуоресценции во время фазы J ( $V_j$ ); в – относительная величина переменной флуоресценции во время фазы I ( $V_i$ )

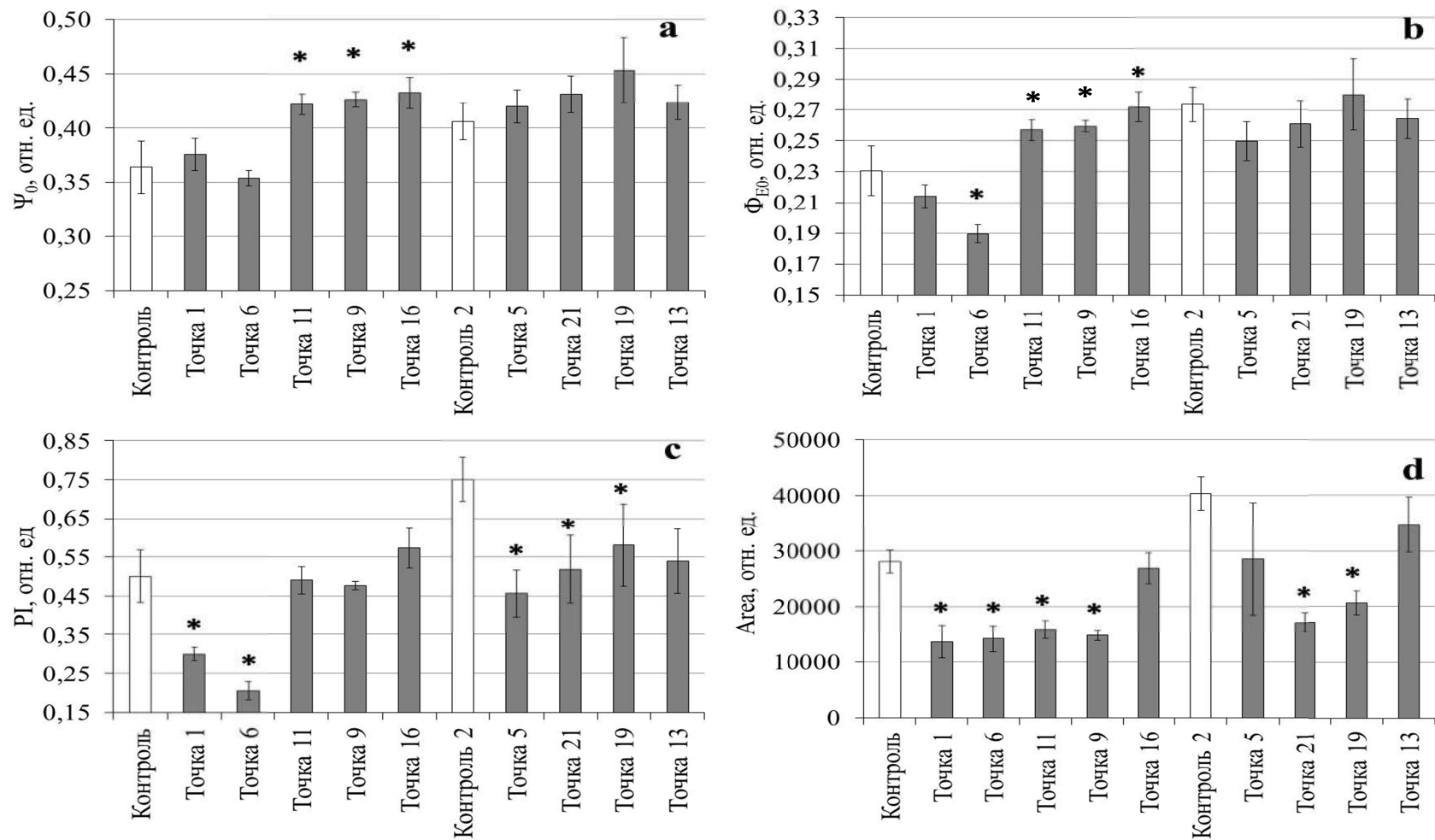


Рисунок 2.33 – Некоторые параметры ОЖР-кривых после 96 ч. экспозиции: а – вероятность транспорта электронов за пределы  $Q_a^-$  ( $\Psi_0$ ); б – квантовая эффективность переноса электронов от  $Q_a^-$  ( $\Phi_{E_0}$ ); в – индекс производительности (PI); д – площадь над кривой индукции флуоресценции (Area)

Также было зарегистрировано изменение уровня переменной флуоресценции во время фаз ОЛР-кривой для отдельных мониторинговых точек (рис. 2.32 а–с). Так, было получено достоверное повышение переменной флуоресценции во время фазы К для точек 1, 6 и 13 (рис. 2.32 а). Фаза К на КИФХ не является основной и может проявляться лишь в ряде случаев, либо для определенных видов фитопланктона. Однако, на данный момент нет точного определения для данной фазы кривой индукции. Согласно литературным данным проявление пика К может свидетельствовать о недостатке питательных веществ для культур фитопланктона (например, недостатка серы или азота) [174, 175]. Таким образом, повышение флуоресценции в данной области КИФХ может свидетельствовать о недостатке биогенных веществ в исследуемых пробах. Также для проб 9, 11 и 16 было получено достоверное снижение показателя  $V_J$  (рис. 2.32 b), т.е. происходило снижение количества закрытых реакционных центров. Снижение значений  $V_J$  в данных пробах может поясняться также, как и для результатов, полученных после 24 часов экспозиции. Однако, для этого необходимо проанализировать остальные кинетические и энергетические параметры флуоресценции.

Достоверное снижение переменной флуоресценции в фазе I было отмечено для мониторинговых точек 9, 11, 16 и 19 (рис. 2.32 c). Следовательно, это указывает на снижение эффективности окисления пула  $PQH_2$  первичными акцепторами фотосистемы I. В данном случае замечания о снижении эффективности функционирования отдельных участков ЭТЦ фотосистем I и II, предложенные для 24-часового биотестирования, также справедливы.

На фоне снижения эффективности окисления пула  $PQH_2$  также происходило снижение общего пула активных акцепторов электронов для точек 9 и 11. Также снижение параметра *Area* наблюдали и для точек 1, 6, 19 и 21 (рис. 2.32 d).

При оценке энергетических параметров КИФХ также были получены количественные изменения для отдельных точек, которые сходны по своему характеру с результатами для 24-часового биотестирования. Так, показатель эффективности переноса энергии возбуждения после первичного акцептора ( $\Psi_0$ ) был достоверно выше контроля для точек 9, 11 и 16 (рис. 2.33 а). После 24 часов биотестирования наблюдали повышение данного параметра для точек 1, 6, 9, 11 и 16 (рис. 2.29 а). Следовательно, для отдельных проб воды негативное воздействие наблюдалось в течение всего временного промежутка биотестирования.

Также наблюдали изменение эффективности переноса электронов от  $Q_a^-$  ( $\Phi_{E_0}$ ) для проб из мониторинговых точек 6, 9, 11 и 16 (рис. 2.29 б). При этом наблюдаемый эффект отличался для разных проб: в точке 6 было получено достоверное снижение значений  $\Phi_{E_0}$ , тогда как в точках 9, 11 и 16 наблюдали более высокие, в сравнении с контролем, показатели.

Достоверное снижение индекса производительности фотосистемы II (PI) были получены для мониторинговых точек 1, 6, 13, 19 и 21 (рис. 2.33 с). Стоит отметить очень низкие значения показателя PI для проб воды из точки 6, что может быть связано с токсическим действием фильтрата на клетки фитопланктона.

В целом, после 24-часовой экспозиции для кинетических параметров флуоресценции ( $V_i$ ,  $V_j$  и  $M_0$ ), достоверно отличающихся от контрольных значений, было зафиксировано только уменьшение, тогда как для энергетических ( $\Psi_0$ ,  $\Phi_{E_0}$  и PI) – наоборот, только увеличение. При этом, при культивировании клеток *Chlorella sorokiniana* на пробах воды из мониторинговых точек около шахты им. А.Ф. Засядько (точка 1) и месте слияния рек Кальмиус и Дурная, ул. Куприна (точка 11) происходили достоверные изменения для всех 10 показательных тест-функций, в пробе из пруда Молодежный (точка 11) – для 9, в пробе из реки

Дурная (точка 9) – для 8, а в пробе из Нижнекальмиусского водохранилища, пр. Дзержинского (точка 6) – для 7. Для проб из мониторинговых точек пруд Алексеевский (точка 13), водохранилище Донецкое море (точка 19) и I пруд парка им. А.С. Щербакова (точка 13) достоверных отличий от контроля зарегистрировано не было.

После 96 часов биотестирования достоверные отклонения наблюдали для всех мониторинговых точек, при этом в большинстве случаев происходило снижение значений тест-функций. Наибольшее число показательных тест-функций было получено для мониторинговых точек в месте слияния рек Кальмиус и Дурная, ул. Куприна (точка 11) и в пробе из реки Дурная (точка 9) – 9 тест-функций.

Отдельно стоит отметить результаты флуориметрии для мониторинговой точки 6, поскольку для большинства проб были отмечены изменения отдельных параметров, тогда как для данной пробы воды фактически все тест-функции отличались от контрольных значений. Если учитывать результаты стандартной методики биотестирования, то полученные результаты не согласуются для мониторинговой точки 21, поскольку никаких изменений в функционировании фотосинтетического аппарата для исследуемой тест-культуры не определялось. Кроме того, при оценке параметров КИФХ был выявлен ряд мониторинговых точек, которые находились вблизи с потенциальными источниками загрязнения и для которых было выявлено достоверное ухудшение состояния фотосинтетического аппарата клеток *Chlorella sorokiniana*. Это, прежде всего, точки 1, 9 и 11, для которых были получены низкие показатели коэффициента прироста (рис. 2.19), квантового выхода (рис. 2.23 и 2.27) и т.д. Несмотря на результаты основной методики биотестирования, можно предположить о загрязнении данных участков русла.

При биотестировании проб воды было установлено токсическое действие на тест-культуру. Но при этом также были получены результаты,

указывающие на негативное воздействие на физиологическое состояние фитопланктона проб воды, для которых не было установлено достоверного токсического действия. Таким образом, результаты флуориметрических методик регистрации световых и индукционных кривых флуоресценции хлорофилла согласуются с результатами рекомендуемой методики биотестирования, но кроме того дают возможность получить более полное представление о состоянии тест-объекта, описывая изменения в функциональном состоянии фотосинтетического аппарата и эффективности его функционирования.

Полученные данные по биотестированию не только подтверждают результаты проведенного мониторинга, но также дают возможность получить более полное представление о состоянии биоиндикаторных организмов, помещенных в условия исследуемой водной среды, значительно расширяя возможности определения качества водных ресурсов. Следовательно, данный метод биотестирования, включая методики по регистрации кривых флуоресценции хлорофилла (индукционных и световых), должен использоваться при оценке состояния поверхностных природных вод наряду с основными методами биомониторинга.

## Глава третья

### **ИНТЕГРИРОВАННАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЙ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ МОНИТОРИНГА**

Идея интегрированной оценки сложных систем связана с математическим описанием многомерных пространств состояний систем и использованием массивов данных наблюдений, приведённых к единой структурированной темпоральной (временной) форме [28, 58]. Макроскопические модели представляют пространство состояний систем как некую сплошную модельную среду с непрерывным распределением переменных состояния. Таким моделям пространств приписываются феноменологические свойства, которые характерны для того или иного класса систем. В работе [58] применительно к сложным системам постулируется применение общих принципов естествознания: универсальное представление данных опыта в виде темпоральных данных, использование закономерностей и критериев сходства и изоморфности, положение о континуальности многомерных пространств состояний, существование эмпирических мер для характеристики в целом состояний объектов и систем, использование математических уравнений теории сплошных сред, справедливость принципа соответственных состояний и т.д. На основе данных принципов формулируется метод измерений состояний систем и объектов различной природы, а также реализация возможности оценки рисков индикативных событий [58, 176].

Используем данный метод применительно к оценке состояний и процессов развития урбанизированных территорий, которые отличаются сложной структурой с множеством взаимосвязанных и взаимодействующих между собой природных, экономических, социальных и технических территориально распределённых подсистем.

### 3.1 Основные понятия и используемые принципы

Для моделирования наблюдаемых процессов и явлений необходимо уметь количественно измерять как свойства объектов, так и их качества. Несмотря на существование целой науки квалиметрии [177], где преимущественно экспертным путем оцениваются качества, вопрос объективного измерения или оценки качественной определенности объектов достаточно сложен и малоизучен. Сегодня во многих научных дисциплинах широко применяются экспертные методы, однако они являются субъективными и не могут служить основой для объективного описания процессов и явлений.

Известно, что каждый объект отличается бесчисленным количеством свойств, единство которых определяет его качество. Однако, обычно в процессе моделирования образ объекта задаётся на конечном множестве отобранных для наблюдения свойств. В философии определение «качество» есть то, что характеризует данный предмет как таковой, что отличает один предмет от другого. Считается, что качество не сводится к отдельным свойствам, а связано с предметом как целым. Часто качество определяют как совокупность существенных свойств (органическое единство), но при этом оговаривают, что не следует качество однозначно связывать со свойствами, сводя его к простой совокупности свойств.

В квалиметрии качество – это совокупность минимально допустимых требований к продукции, обуславливающих её пригодность удовлетворять определённые потребности в соответствии с её назначением. Практически в квалиметрии качество чаще всего сводят к совокупности свойств [58].

В 1994 году Международной организацией по стандартизации ИСО понятие *качество* определено как совокупность характеристик объекта, относящихся к его способности удовлетворять установленные и

предполагаемые потребности потребителя [178, 179]. Международный стандарт ISO 9000-2000 определяет качество как степень, до которой совокупность собственных характеристик продукции, процесса или системы удовлетворяет сформулированные потребности или общепонятные или обязательные ожидания.

Методология оценки качеств в квалиметрии включает в себя методы статистического контроля качества, опросы и анкетирование, методы экспертной оценки, методы измерения производительности, использование стандартов и нормативов.

Однако, сегодня в квалиметрии обоснованные теоретические методы, основанные на объективном анализе интегрированных показателей и характеристик объектов, полностью отсутствуют. В этом плане описание состояний сложных систем и объектов и соответствующих критериев объективной оценки их качеств является актуальной задачей.

Известно, что все науки в своем содержании опираются на анализ и обобщение опытных фактов и данных, поэтому возникает проблемный вопрос: можно ли применить для интегрированной оценки состояний и процессов развития урбанизированных территорий предложенную в работе [58] общую схему модельного описания эмпирических и статистических данных, характеризующих системы различной природы?

Будем считать, что множество объектов одного класса может характеризоваться в определенный момент времени оценкой свойств и качеств каждого наблюдаемого объекта по отношению к аналогичным величинам, наблюдаемым у объекта, который условно принят за опорный или эталонный объект. В свою очередь, изменчивость может характеризоваться оценкой состояний объектов по отношению к состоянию опорного объекта, которое в прошлом наблюдалось в определенно заданный момент времени, а также оценкой совершаемых этими объектами процессов по отношению к эталонному процессу опорного объекта.

В каждом вышеуказанном случае необходимо уметь создавать измерительные шкалы для характеристики как отдельных свойств объектов, так и их совокупностей, так как в основу всех наблюдений и экспериментов положен естественнонаучный метод измерений. Как отмечал М. Борн, идея инвариантов является ключом к рациональному пониманию реальности, и не только в физике, но и в каждом аспекте мира, при этом сущность инвариантности состоит в сохранении любого рода объектов по отношению к различным типам изменений [180].

Будем представлять массивы эмпирических данных в многомерных пространствах состояний сложных систем относительно переменных состояния, и использовать инварианты в виде различных эмпирических мер сходства для описания состояний объектов и построения математических моделей и измерительных шкал.

Одной из основных категорий науки является понятие объекта. В данном исследовании в качестве объекта будем рассматривать участки, элементы, подсистемы или части урбанизированных территорий или природно-технических систем. Каждый объект обладает определенным набором свойств, которые носят количественный характер. *Свойство* – объективная и атрибутивная характеристика, которая отражает некий существенный и неотъемлемый признак или отличительную особенность объекта. *Параметр* свойства – количественная величина, характеризующая свойство объекта и имеющая численное значение. Совокупность свойств формирует количественную определенность объекта.

*Класс* объектов – множество однотипных объектов, обладающих общими свойствами и качественными признаками. На формализованном уровне под этим будем понимать обобщенное (абстрактное) описание множества однотипных объектов, для которых имеются данные наблюдений об их развитии, функционировании или поведении во

времени. При этом отдельные объекты являются конкретными представителями своего класса, которые будем называть, как общепринято, *экземплярами* класса.

Условно под *системой* (*макросистемой*) в данном исследовании будем понимать весь класс объектов в целом, подразумевая некое сходство в данных понятиях и исходя из того, что все экземпляры класса подчиняются общим закономерностям.

Понятия качество, количество и мера присущи как естественным, так и гуманитарным наукам и играют в науке фундаментальную роль. Однако, если исходить из общесистемных понятий, которые могут быть формализованы, то данные категории не имеют общепринятых определений. Научная логика не обеспечивает пока адекватного и формализованного понимания и представления качеств несмотря на то, что особенности объектов определяются их качественными признаками.

Качество объекта или системы будем связывать с видовыми, типовыми, образными отличиями. Исходя из этого, используем следующее определение.

*Качество* объекта – категория, выражающая сущность объектов и в определенном аспекте отражающая совокупность атрибутивных (существенных) признаков, особенностей и свойств, которые отличают один класс объектов от других и придают данному классу и экземплярам класса качественную определённость [58].

К понятию «атрибутивные» будем относить существенные (значимые) в наблюдаемых условиях величины, которые при моделировании наиболее полно отражают изменения состояний объекта и могут нести определенное знание по отношению к предметному содержанию изучаемого объекта.

Будем предполагать, что оценка качеств относительна, однако в основу такой оценки должны быть положены величины, связи или

отношения, инвариантные при преобразованиях параметров свойств объектов и времени. Используя основные принципы моделирования, предполагаем, что качественная определенность объекта в некоем аспекте качественных признаков (или совокупности свойств) может быть количественно оценена. Оценки качеств будем производить на основе *комплексных* (интегрированных) величин, которые характеризуют объект как целое, исходя из системных представлений. Такие величины в дальнейшем будем называть эмпирическими мерами [28, 58].

Приведенное выше позволяет в общем случае представить *состояние* объекта в виде совокупности его качественных и количественных характеристик, которые формируются под действием внешних и внутренних условий в конкретный момент времени.

Такой подход при моделировании дает возможность считать, что первой основой для характеристики состояния является количественная определенность объекта, связанная с его свойствами. Второй основой для характеристики состояния является качественная определенность объекта, которая количественно может быть оценена с использованием системных величин, комплексно характеризующих изучаемые объекты в целом по отношению ко всему классу объектов, или к отдельным экземплярам класса, принятым в качестве опорных или эталонных для данного класса.

Исходя из этого, любой *процесс* определяется как закономерное изменение состояния объекта в последовательные моменты наблюдения.

Таким образом, в формализованном представлении класс объектов можно представлять как совокупность всех состояний системы (пространство состояний), если в качестве макросистемы рассматривать весь наблюдаемый класс объектов в целом. В свою очередь, процессы будут отражать изменчивость состояний объектов как экземпляров класса в данном пространстве состояний.

Для описания и характеристики состояний и процессов кроме изменения свойств объектов используем понятие *события* – любой наблюдаемый факт, который выражается в изменении состояния объекта. *Последовательность* событий – ряд однородных событий, происходящих одно за другим в последовательные моменты наблюдения. *Характеристическая величина* события – параметр, показатель или характеристика, непосредственно относящиеся к событию и имеющие численное значение.

Событие будем понимать в широком смысле, включая в его суть как наблюдаемые качественные и количественные факты явлений, реакций, эффектов, результатов действий и т.д., так и факты измерения различных величин в процессе их одиночного изменения или их изменения в совокупности [28, 58].

Считается, что свойства и события в совокупности полностью отражают состояние объекта и однозначно характеризуют процессы, а также качественные и количественные изменения в состояниях объектов. Таким образом, информацию о процессах изменения состояний объектов могут нести в себе как параметры свойств, так и характерные (индикативные) события и их характеристические величины. Для каждого такого события может быть определена его апостериорная вероятность или найдено значение соответствующей характеристической величины (нескольких величин) – значений параметров свойств, комплексных показателей или характеристик состояния объекта.

В данном исследовании за *вероятность состояния* объекта (некоего состояния  $M$ ) принимается вероятность совместного события наблюдения значений нескольких параметров свойств (переменных состояния) или вероятность некоего индикативного события, характеризующего процесс изменения состояния объекта в определенном аспекте.

Для того, чтобы иметь возможность измерять качества объектов необходимо иметь возможность связывать между собой качества и свойства объектов. Поэтому единство качественной и количественной определенности будем выражать через меру.

Сегодня в философии понятие меры определено на вербальном уровне. В соответствии с существующим определением мера – это философская категория, отражающая единство качественных и количественных характеристик предмета или явления. Очень часто мера трактуется как диапазон или область количественных изменений, которые могут происходить при сохранении данного качества объекта. Исходя только из данных определений, формализовать понятие меры невозможно. Поэтому в дальнейшем введем понятие меры как математическую функцию, выражающую единство качественной и количественной определенности по отношению к классу объектов, которая отличалась бы особым свойством в пространстве состояний объектов, например, континуальностью, аддитивностью, потенциальностью, постоянностью и т.д. [28, 58]. Другими словами, меру будем рассматривать как некую функцию, характеризующую пространство состояний или поле состояний для класса объектов в целом. В свою очередь, для оценки качеств каждого экземпляра класса должна существовать также некая эмпирическая мера, определение которой дадим чуть ниже.

Отсюда следует основная цель применения теории моделирования систем различной природы, которая заключается в определении связей между предшествующими, текущими и последующими состояниями объектов различных классов с учетом единства качественных и количественных характеристик объектов. Математически описать данную задачу можно путем установления соответствия между различными мерами, определяющими качество объектов, и параметрами свойств объектов [28, 58].

Будем изучать множество объектов одного класса, каждый из которых в определенный момент времени находится в некотором состоянии, исходя из сложившихся внешних и внутренних условий. Информацию о состояниях объектов несут в себе результаты наблюдений в виде эмпирических данных. Предположим, что каждое состояние объекта однозначно определено значениями всех его параметров  $z_k$  (в общем случае  $n$ ). Данные атрибутивные и независимые параметры свойств однозначно характеризуют количественную определенность каждого объекта.

Рассматриваем данные наблюдений темпоральной структуры (рис. 3.1). В этом случае речь идет о массивах дискретных данных, которые имеют общую структуру таблиц в виде «объекты–параметры свойств», причем соответствующее количество таблиц  $h$  упорядочено во времени с шагом, равным некоторому временному диапазону [28, 47, 58, 181]. В частном случае такие данные могут иметь только одну таблицу (рис. 3.1,  $h=1$ ), это возможно, когда параметры свойств объектов не изменяются на длительных промежутках времени.

Темпоральные данные – это массивы данных, хранящие временные данные. В широком смысле – это произвольные данные, которые явно или неявно связаны с определенными датами или промежутками времени. Особенность таких данных состоит в том, что они несут в себе информацию о любых процессах, происходящих в природе и обществе.

В темпоральных массивах данных в качестве объектов выступают однотипные классы (сущности), соответствующие объектам определенной природы. В качестве параметров (атрибутов), выступают свойства в виде различных физико-химических, биологических, социальных, экономических или других величин, имеющих количественное измерение (рис. 3.1). При этом для каждого процесса изменения состояния объекта характерны определенные последовательности состояний с заданными параметрами свойств, изменяющимися во времени.

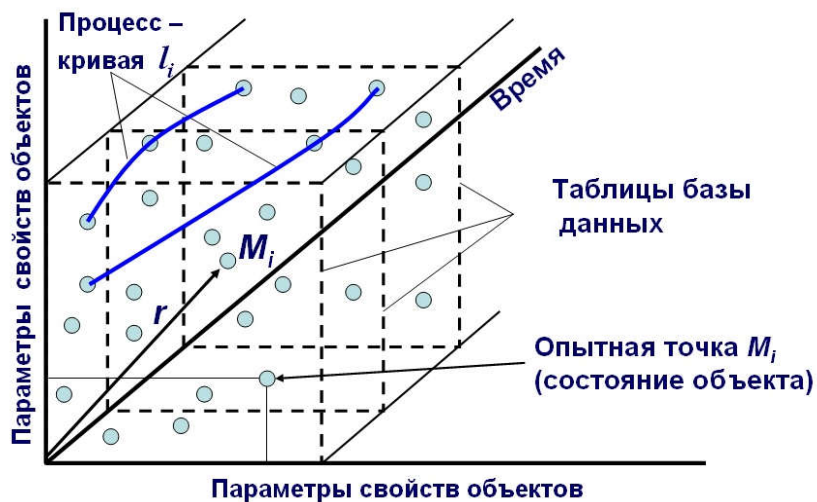
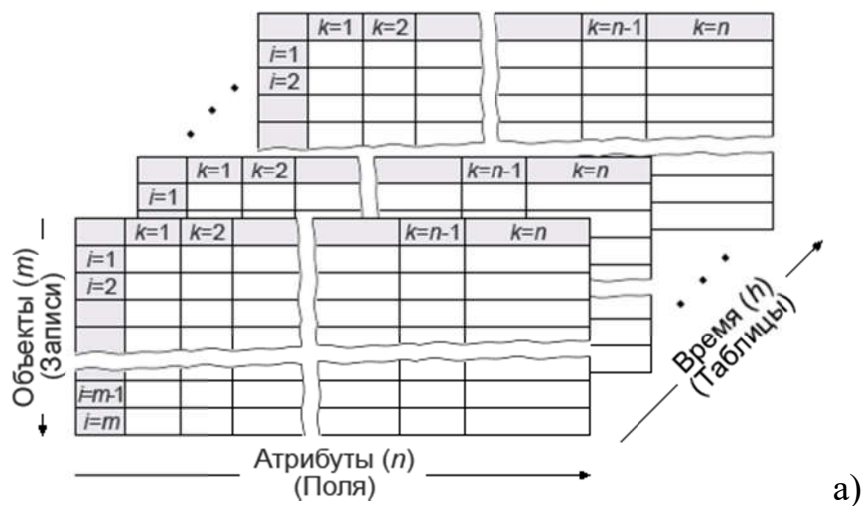


Рисунок 3.1 – Темпоральные массивы данных, характеризующие изменения состояний объектов: а) структура темпоральных массивов данных; б) пространство состояний объектов

Для темпоральных данных можно построить общую среду моделирования в виде многомерного пространства состояний объектов (так называемого фазового пространства). Предположим, что для  $m$  объектов одного класса в темпоральных массивах данных содержится количественная информация о  $n$  параметрах  $z_k$  ( $k=1, 2, \dots, n$ ), характеризующих свойства изучаемых объектов (рис. 3.1). Примем эти величины в качестве переменных состояния.

Зададим  $n$ -мерное пространство состояний  $E^n$ , где  $z = (z_1, z_2, \dots, z_n)$ ,  $z \in E^n$ . Примем гипотезу о существовании *эмпирической меры*  $W$ , которая представляет собой величину, характеризующую в целом состояние каждого объекта, исходя из интегрированной оценки качественной определенности объектов. Мера  $W$  будет представлять собой системную величину, определяющую сходство состояний объектов между собой.

Эта величина позволяет оценить качественное состояние объектов в определенном аспекте и зависит от параметров свойств объектов  $z_1, z_2, \dots, z_n$ . Математически эмпирическую меру будем рассматривать как особую функцию многих переменных состояния – величину, которая является инвариантом в пространстве состояний  $E^n$ .

Таким образом, каждому состоянию в пространстве  $E^n$  (точке  $M$ ) может быть поставлено в соответствие значение эмпирической меры  $W$ . Тем самым при справедливости гипотезы континуальности в пространстве состояний  $E^n$  формируется скалярное поле эмпирической меры как совокупность ее значений во всех точках  $E^n$  в заданный момент времени.

Примем также, что при совершении во времени некоего процесса  $l$  развития или функционирования произвольного объекта параметры свойств объекта всегда представимы параметрическими уравнениями относительно времени  $\tau$ :

$$z_1 = z_1(\tau), \quad z_2 = z_2(\tau), \quad \dots, \quad z_n = z_n(\tau). \quad (3.1)$$

Непрерывную кривую в  $n$ -мерном пространстве состояний (рис. 3.1,  $l_i$ ), образованную уравнениями (3.1), будем называть линией процесса для конкретного объекта. Таким образом, задача моделирования применительно к состояниям объектов может быть сформулирована в следующем виде.

Имеются результаты опыта или наблюдения в виде дискретных темпоральных данных, относящихся к некоему множеству однотипных

объектов определенной природы. Формируется фазовое пространство состояний  $E^n$  относительно параметров свойств объектов. Предлагается некая эмпирическая мера  $W = W(M)$  в виде полевой величины, где  $M$  – произвольное состояние. При этом эмпирическая мера характеризует качественную определенность объекта в некотором аспекте. В пространстве  $E^n$  представлены данные опыта или наблюдений в виде дискретных точек  $M_i$ . Априори предлагается математическая модель пространства состояний  $E^n$  в виде задания некой среды моделирования  $W(M) = T(z_1, z_2, \dots, z_n)$ . Применяя различные принципы и гипотезы, характеризующие развитие, функционирование или поведение объектов во времени, следует построить феноменологическую модель для описания состояний объектов в пространстве  $E^n$ , которая будет характеризовать эмпирические закономерности, присущие данным опыта или статистическим наблюдениям [28, 58].

Основные гипотезы, которые могут быть использованы при описании состояний объектов, связаны принципами общесистемного характера. В качестве таких положений будем использовать принцип континуальности пространства состояний, принцип инвариантности эмпирических мер, а также принцип соответственных состояний, заключающийся в наличии измеряемого сходства в состояниях объектов.

Пусть в  $n$ -мерном фазовом пространстве  $E^n$  расположено  $q = m h$  дискретных точек  $M_i$  ( $i = 1, 2, \dots, q$ ), которые являются опытными данными. Представим эти точки как ограниченную выборку из сплошной гипотетической среды бесконечного количества состояний для объектов одного класса. Используем континуальный принцип представления информации в пространстве  $E^n$  [28, 58, 181], согласно которому поле состояний считается непрерывным, при этом каждый элемент поля связан

со всеми соседними элементами с учетом закономерностей, свойственных пространству состояний  $E^n$ . Тем самым рассматривается концепция континуального поля некоторой величины, характеризующей состояния объектов в целом. Такой величиной и будет выступать эмпирическая мера.

Считаем также, что по отношению к наблюдениям справедлив принцип инвариантности, когда в пространстве состояний дискретные данные формируют некий «образ», отражающий в какой-то степени сущность континуальных закономерностей полевой величины. При этом инвариантность образа будет связана с изометрией пространства  $E^n$ , когда сохраняются расстояния между опытными точками  $M_i$ , измеренные или оцененные определенным образом. Эмпирическая мера как полевая величина  $W=W(M)$  обладает свойством неизменности по отношению к преобразованиям переменных  $z_1, z_2, \dots, z_n$ .

Отметим, что эмпирических мер, характеризующих различные качественные аспекты при описании состояний объектов, может быть несколько. Возможно использование мер, основанных на геометрических, вероятностных и алгоритмических мерах сходства.

В процессе моделирования будем рассматривать квазистационарные процессы, используя ранее принятые определения. Считаем, что для такого процесса эмпирическая мера может быть представима в виде:

$$W(\tau) = W(z_1(\tau), z_2(\tau), \dots, z_n(\tau)). \quad (3.2)$$

Таким образом, при моделировании множества состояний для некоего класса объектов может быть построена формализованная среда моделирования, обладающая заданными свойствами и позволяющая описать континуальные закономерности в виде математических зависимостей. Подобная среда моделирования представляется в виде  $n$ -мерного пространства состояний  $E^n$ .

### 3.2 Выбор эмпирических мер и моделей пространства состояний

Будем рассматривать метрические пространства состояний и считаем, что способ определения расстояния между двумя произвольными состояниями известен и задан системой измерения эмпирической меры, как величины для оценки сходства состояний объектов.

Основная гипотеза моделирования связана с возможностью описания континуальных закономерностей путем установления связи между полевой величиной в виде эмпирической меры  $W = W(M)$  и априори заданной моделью пространства состояний в виде вещественно однозначной функции  $T = T(z_1, z_2, \dots, z_n)$ . При этом эмпирическая мера может быть описана скалярным полем  $W = W(M)$ , которое инвариантно при преобразованиях координат. Данная величина будет отражать эмпирические особенности и закономерности наблюдаемых состояний и процессов их изменения как геометрических образов (точек и кривых) в пространстве  $E^n$ , исходя из полевых представлений. Мету  $W$  будем определять на основе данных опыта, характеризующих положение точек поля  $M_i$  по отношению к характеристикам отдельных объектов или группы объектов в целом. Для этой цели в зависимости от конкретной задачи используем геометрические, вероятностные, алгоритмические или иные меры сходства. Выбор той или иной меры будем основывать на вариантных расчетах и оценках качества получаемых моделей.

В свою очередь, модель пространства состояний  $T = T(z_1, z_2, \dots, z_n)$  задаем скалярной функцией, зависящей от переменных состояния. Данная величина будет отражать особенности фазового пространства как сплошной среды, исходя из той или иной принятой математической модели. В зависимости от специфики решаемой задачи ее будем представлять в виде простых зависимостей относительно всех  $n$  переменных. При этом функцию  $T$  следует определять по значениям переменных состояния по отношению к используемой системе координат.

*Эмпирические меры состояний объектов.* В контексте вышеприведенного важным является выбор мер  $W$  как качественных характеристик состояний объектов или процессов изменения состояний, а также разработка систем количественного определения этих величин. Эмпирическая мера должна быть инвариантом в пространстве состояний и комплексно характеризовать состояния объектов, а также их изменения, соответствовать понятию скалярных величин, иметь область определения от нуля до  $+\infty$  или от  $-\infty$  до  $+\infty$ , давать возможность оценивать состояния и процессы изменения состояний на основе принятой системы измерений применительно ко всему пространству состояний  $E^n$ . Данная полевая величина будет непосредственно связана с особенностями распределения эмпирических данных, т.к. определяется по отношению к опорному состоянию или всей группе дискретных точек  $M_i$  в целом и не зависит от принятой системы координат для переменных состояния, т.к. является инвариантом.

В дальнейшем при геометрическом подходе для определения эмпирической меры использовалось преимущественно евклидово расстояние. В этом случае каждой опытной точке  $M_i$  присваивалось значение эмпирической меры как расстояния до опорного состояния  $M_0$  (расстояния между состояниями) в виде:

$$W_i = \sqrt{(z_{1i} - z_{1_0})^2 + (z_{2i} - z_{2_0})^2 + \dots + (z_{ni} - z_{n_0})^2}, \quad (3.3)$$

где  $z_{k_0}$  – значения параметров опорного состояния. Иногда применялся также квадрат евклидова расстояния:

$$W_i = (z_{1i} - z_{1_0})^2 + (z_{2i} - z_{2_0})^2 + \dots + (z_{ni} - z_{n_0})^2. \quad (3.4)$$

В случае, когда переменные состояния имели различные размерности, величины  $z_k$  приводились к безразмерному виду.

При статистическом подходе эмпирическая мера для каждой опытной точки  $M_i$  определялась на основе вычислительных алгоритмов, позволяющих оценить вероятности состояний объектов. При этом использовались следующие меры:

- статистическая вероятность наблюдения состояния объекта (точки  $M_i$ ) в определенном объеме пространства состояний  $E^n$  при группировке данных, исходя из заданного количества диапазонов группирования;
- относительная частота наблюдения состояний всех объектов в определенном объеме пространства  $E^n$ , образованного состоянием каждого объекта (точка  $M_i$ , представленная в виде правой верхней вершины многомерного параллелепипеда);
- статистическая вероятность индикативных событий, отражающих состояние объектов в некоторых аспектах и т.д.

Статистическая вероятность состояния определялась по различным индикативным событиям. В первом и втором случае в качестве такого события использовалось совместное событие одновременного наблюдения значений параметров свойств объекта, для этого применялись разные алгоритмы обработки данных. В третьем случае использовалось некое характерное событие, связанное с наблюдением определенных качественных изменений в состояниях объектов. Вероятности определялись в отдельности для каждой таблицы темпорального массива данных и суммировались в последовательном порядке.

Алгоритм определения статистической вероятности совместного события, связанного с наблюдаемыми свойствами для опытных точек  $M_i$  (для одной таблицы данных), предполагает следующую последовательность действий [28, 58]. При рассмотрении одного параметра  $z_1$  на координатной оси  $Oz_1$  область изменения параметра разбивается на  $\omega$  равномерных интервалов и опытные данные группируются, исходя из попадания точек в

каждый интервал. Статистическая вероятность оценивается по кумулятивной относительной частоте наблюдаемого события. С этой целью определяется число опытных точек, для которых выполняется неравенство  $z_1 < z_{1\omega}$ , где  $z_{1\omega}$  – правая точка каждого  $\omega$ -того интервала. Аналогично при рассмотрении двух параметров  $z_1$  и  $z_2$  на плоскости  $Oz_1z_2$  определяется число опытных точек, для которых совместно выполняются неравенства  $z_1 < z_{1\omega}$  и  $z_2 < z_{2\omega}$ . При рассмотрении трех параметров  $z_1$ ,  $z_2$  и  $z_3$  в трехмерном пространстве  $Oz_1z_2z_3$  определяется число точек, для которых совместно выполняются неравенства  $z_1 < z_{1\omega}$ ,  $z_2 < z_{2\omega}$  и  $z_3 < z_{3\omega}$ . Также определяется число опытных точек, попавших в области группирования, для  $n$ -мерного пространства параметров свойств. Если при разбиении для каждого параметра используется одинаковое количество интервалов, то для одного параметра имеем  $\omega$  областей группирования, для двух –  $\omega^2$ , для трех –  $\omega^3$  и т.д. Все это позволяет оценить статистические вероятности состояния по относительной частоте событий. Однако данный метод требует достаточно большого объема опытных данных (для трех переменных количество объектов должно быть порядка 300–400).

Статистические вероятности для совместного события, связанного с одновременно наблюдаемыми значениями параметров свойств, находятся в  $n$ -мерном пространстве согласно следующей зависимости:

$$w_\lambda = P(z_1 < z_{1\omega}, \dots, z_n < z_{ng}) = \frac{I_\lambda}{N}, \quad (3.5)$$

где  $I_\lambda$  – число всех опытных точек, для которых совместно выполняется приведенное в формуле (3.5) неравенство  $(z_1 < z_{1\omega}, \dots, z_n < z_{ng})$  и которые находятся в  $n$ -мерном параллелепипеде, представляющим собой некую  $\lambda$ -область группирования;  $N$  – общее число точек (опытных данных в выборке).

Например, в системе *Statistica* скрипт подсчета вероятности для одномерного распределения величины (одно свойство) согласно (3.5) имеет следующий вид (20 интервалов группирования):

```

Function Minimum (Data As Spreadsheet, Var As PortInt) As Double
' Функция определения минимального значения в выборке данных
  Minimum = Data.Cells(1,Var)
  For I = 2 To Data.Cases.Count
    If Data.Cells(I,Var) < Minimum Then
      Minimum = Data.Cells(I,Var)
    End If
  Next I
End Function

Function Maximum (Data As Spreadsheet, Var As PortInt) As Double
' Функция определения максимального значения в выборке данных
  Maximum = Data.Cells(1,Var)
  For I = 2 To Data.Cases.Count
    If Data.Cells(I,Var) > Maximum Then
      Maximum = Data.Cells(I,Var)
    End If
  Next I
End Function

Sub Main
  Dim s_in    As Spreadsheet
  Dim s_out   As Spreadsheet
  Dim K       As Long
  Dim Min     As Double
  Dim Max     As Double
  Dim Step    As Double
  Dim Coord   As Double
' Ссылка на текущий лист с данными и создание нового листа
  Set s_in = ActiveSpreadsheet
  Set s_out = Spreadsheets.New
' Показать новый лист расчетных данных
  s_out.Visible = True
' Определение минимального и максимального значений величины
  Min = Minimum(s_in,1)
  Max = Maximum(s_in,1)
' Задание количества групп (K) и расчет шага изменения величины
  K = 20
  Step = (Max-Min)/K
' Присвоение размеров новому листу расчетных данных
  s_out.SetSize(K, 4)
' Определение статистической и геометрической вероятностей

```

```

Count = 1
For II=1 To K
  Coord = Min+(II*Step)
  Points = 0
  For I = 1 To s_in.Cases.Count
    If s_in.Cells(I,1) < Coord Then
      Points = Points + 1
    End If
  Next I
  s_out.Cells(Count, 1) = Coord
  s_out.Cells(Count, 2) = Points
  s_out.Cells(Count, 3) = Points/s_in.Cases.Count
  s_out.Cells(Count, 4) = (Coord - Min) / (Max - Min)
  Count = Count + 1
Next II
End Sub

```

В свою очередь, скрипт подсчета вероятности для двумерного распределения величины согласно (3.5) аналогичен приведенному выше, при этом алгоритм определения статистической и геометрической вероятностей имеет следующий вид:

```

For II=1 To K
  For I2 = 1 To K
    Coord(1) = Min(1)+ I2*Step(1)
    Coord(2) = Min(2)+ I2*Step(2)
    Points = 0
    For I = 1 To s_in.Cases.Count
      If s_in.Cells(I,1) < Coord(1) And s_in.Cells(I,2) < Coord(2) Then
        Points = Points + 1
      End If
    Next I
    s_out.Cells(Count, 1) = Coord(1)
    s_out.Cells(Count, 2) = Coord(2)
    s_out.Cells(Count, 3) = Points
    s_out.Cells(Count, 4) = Points/s_in.Cases.Count
    s_out.Cells(Count, 5) = (Coord(1) - Min(1))/(Max(1)-Min(1))
    s_out.Cells(Count, 6) = (Coord(2) - Min(2))/(Max(2)-Min(2))
    Count = Count + 1
  Next I2
Next II

```

Аналогично определяется функция распределения для  $n$ -мерного пространства параметров свойств. Таким образом, для опытных данных

может быть найдена функция распределения статистической вероятности каждого состояния, исходя из имеющегося массива опытных данных.

Использовался также алгоритм оценки относительной частоты наблюдения состояний всех объектов в определенном объеме пространства  $E^n$ , образованного состоянием каждого объекта (точка  $M_i$ , представленная в виде правой верхней вершины многомерного параллелепипеда). В этом случае при определении частоты наблюдения событий количество объектов может быть существенно меньше.

Например, соответствующий скрипт определения кумулятивного количества точек для совместного события наблюдения значений трех параметров  $z_1$ ,  $z_2$  и  $z_3$  имеет следующий вид:

```

For i = 1 To K
  k = 0
  For j = 1 To K
    If i < j Then
      If ((s.Cells(i,A) >= s.Cells(j,A)) And (s.Cells(i,B) >= s.Cells(j,B)) And
(s.Cells(i,C) >= s.Cells(j,C))) Then
        k = k + 1
      End If
    End If
  Next j
  s.Cells(i,15) = k + 1
Next i

```

Здесь  $K$  – число строк (количество объектов) таблицы данных,  $A$ ,  $B$ ,  $C$  – номера колонок таблицы, в которых записаны значения параметров  $z_1$ ,  $z_2$  и  $z_3$  соответственно. В работах [28, 58] приводятся и другие алгоритмы определения вероятности различных индикативных событий.

При эмпирическом подходе для оценки сходства состояний эмпирическая мера в виде комплексного индекса определялась непосредственно по переменным состояниям путем построения линейных интегрированных шкал для измерения состояний. В этом случае применялся регрессионный, нейросетевой или иной алгоритмический метод.

Например, при использовании регрессионных методов для опорного объекта измерительная шкала формировалась по ретроспективным данным в следующем виде:

$$\theta_i = \alpha_0 + \alpha_1 z_1 + \alpha_2 z_2 + \dots + \alpha_n z_n, \quad (3.6)$$

где  $\alpha_k$  – коэффициенты регрессии.

При применении нейросетевых методов измерительная шкала состояний может формироваться на основе использования алгоритмов нейронных сетей. В этом случае линейная или нелинейная измерительная шкала может задаваться путем использования нейросетевых моделей или метрик подобия (косинусное сходство), расстояния Минковского, Чебышева и т.д.

В дальнейшем выбор тех или иных эмпирических мер  $W$  осуществлялся исходя из специфики решаемых задач и качества получаемых уравнений.

*Модели пространства состояний.* Математическая модель фазового пространства состояний связана с переменными состояния  $z_1, z_2, \dots, z_n$  и задается относительно простыми функциями, зависящими от этих переменных, как координат пространства  $E^n$ . Модель пространства  $E^n$  в зависимости от специфики решаемой задачи представлялась в виде непрерывных функций относительно всех  $n$  переменных мультипликативными, аддитивными, однородными или иными зависимостями. В этом случае в качестве модели могут быть использованы различные скалярные функции в виде:

- меры относительных изменений

$$T = \frac{z_1 z_2 \dots z_n}{z_{1_0} z_{2_0} \dots z_{n_0}}; \quad (3.7)$$

- простого евклидова расстояния или квадрата этого расстояния

$$T = \sqrt{z_1^2 + z_2^2 + \dots + z_n^2}; \quad (3.8)$$

$$T = z_1^2 + z_2^2 + \dots + z_n^2; \quad (3.9)$$

- простой или взвешенной суммы

$$T = z_1 + z_2 + \dots + z_n; \quad (3.10)$$

$$T = \alpha_1 z_1 + \alpha_2 z_2 + \dots + \alpha_n z_n \quad (3.11)$$

или других моделей, отвечающих специфике решаемой задачи. Особо обращалось внимание на единицы измерения переменных состояния.

При использовании вероятностных эмпирических мер модель пространства состояний может быть представлена, например, в виде геометрической вероятности:

$$T = \frac{z_1 z_2 \dots z_n}{z_{1\max} z_{2\max} \dots z_{n\max}} \quad (3.12)$$

или меры относительных изменений (3.7).

В данной работе рассматриваются скалярные функции  $T$ , входящие в класс мультипликативных или однородных функций. Выбор той или иной математической модели пространства состояний определяется спецификой решения конкретной задачи и результатами обработки опытных данных.

Далее покажем, что во многих случаях на основе опытных данных можно установить однозначную связь между эмпирическими мерами  $W$ , характеризующим опытные данные, и принятыми функциями  $T$ , определяющими математические модели пространства состояний.

### **3.3 Интегрированная оценка состояний объектов и построение измерительных шкал**

Важной задачей является построение измерительных шкал для интегрированной оценки, исходя из возможности применения различных эмпирических мер. В основу этого может быть положен

феноменологический подход, отличающийся применением естественно-научных принципов по отношению к описанию состояний объектов.

Среди таких принципов следует особо выделить принцип соответственных состояний, согласно которому состояния объектов могут подчиняться одному уравнению, если это уравнение выразить через некоторые приведённые переменные [28, 58].

При совершении любого процесса  $l$  в окрестности произвольного состояния  $M$ , предполагаем справедливость соотношений вида  $dQ = c_l d\theta$ , где  $Q$  – некая величина, характеризующая определенный процесс изменения состояний  $l$ ;  $\theta$  – величина, характеризующая состояние объекта и зависящая от эмпирической меры;  $c_l$  – феноменологическая величина, которую будем называть темпоральностью процесса  $l$ . Данное соотношение определяет связь между приращениями величин  $dQ$  и  $d\theta$  и, в определенной степени, связано с понятием производной по направлению. Это позволяет сравнивать между собой процессы, которые совершаются объектами и оцениваются через изменения величины  $Q$ , по отношению к изменениям величины  $\theta$ . В свою очередь, состояния объектов в каждой точке  $M$  можно сравнивать между собой по отношению к значениям величины  $\theta$ , эмпирической меры  $W$  и функции  $T$ .

Принцип соответственных состояний широко используется при построении моделей объектов и систем. Количественные знания о свойствах различных объектов обычно представляются в форме уравнений состояний, где одни параметры выражаются через другие. Уравнения состояния строятся на основе опытных данных и отражают эмпирический опыт человечества в области изучения систем самой разной природы. Обычно такие уравнения состояния представляются в виде:

$$F\left(\frac{z_1}{z_{1_0}}, \frac{z_2}{z_{2_0}}, \dots, \frac{z_n}{z_{n_0}}\right) = 0, \quad (3.13)$$

где  $z_{k_0}$  – значения параметров опорного состояния для класса объектов.

Для построения уравнений выбирается опорный объект или опорное состояние, и все остальные состояния соотносятся с выбранной точкой в пространстве  $E^n$ , на основе созданной системы измерений. В общем случае принцип соответственных состояний можно сформулировать в виде: для объектов одного класса может наблюдаться закономерность, когда состояния объектов связаны с некоторыми характерными состояниями одинаково. Справедливость принципа в каждом случае проверяется по имеющимся опытным данным.

Указанный принцип позволяет построить шкалу для относительного сравнения состояний объектов между собой по факту изменения значений эмпирической меры. Процедура построения таких шкал досконально проработана в термометрии [182, 183]. Воспользуемся соответствующей логикой построения шкал для сравнения состояний объектов. Сущность метода заключается в выборе в пространстве  $E^n$  как опорного состояния, так и некоторого эталонного процесса. Это связано с тем, что при моделировании необходимо иметь возможность сравнивать между собой как состояния объектов, так и процессы, совершаемые этими объектами.

Известно, что расстояние между двумя состояниями, принадлежащими одной линии процесса, совершенного за заданное время  $\Delta\tau$ , является инвариантом, так как геометрически его можно рассматривать как интервал между двумя точками. Поэтому, если задать в пространстве состояний  $E^n$  некий эталонный процесс между двумя опорными состояниями, то за тот же интервал времени можно сравнивать между собой различные процессы, совершаемые объектами, относительно этого эталонного процесса. Для их сравнения может быть использован критерий в виде различных отношений для отрезков кривых процессов (или других величин), описываемых состояниями объектов за заданную единицу времени. Если этот критерий может быть определен по опытным

данным, то можно говорить о возможности сравнения процессов в пространстве состояний  $E^n$ .

Исходя из этого, в начале построим шкалу для относительного сравнения состояний объектов [28, 58, 181]. Выберем некий линейный эталонный процесс (рис. 3.2), совершенный за заданное время  $\Delta\tau$ , на котором отметим опорное состояние  $M_0$ .

Данный процесс может относиться непосредственно к наблюдаемому объекту, состояния которого меняются с течением времени, или к некоему виртуальному процессу, соединяющему два особо выделенных состояния для различных периодов времени. В случае, если состояния объектов не изменяются с течением времени (частный случай темпорального массива данных с одной таблицей), это может быть отрезок между двумя выбранными опорными состояниями разных объектов.

На эталонном процессе для четко заданного временного диапазона отмечаем второе опорное состояние  $M'_0$  и два указанных состояния соединяем прямой линией. Полученный отрезок делим на заданное количество одинаковых интервалов, например, 100, и устанавливаем длину полученных отрезков  $\sigma$ , исходя из известных значений принятой эмпирической меры и значений параметров свойств в точках  $M_0$  и  $M'_0$ .

При геометрическом подходе из начала координат проводим луч  $OM_0$  и находим длину отрезка  $OM_0$ . Шкалу для измерений состояний объектов формируем в виде некоего индекса  $\theta$  применительно к лучу  $OM_0$  с единицей измерения  $\sigma$ , при этом длина отрезка  $OM_0$  в данной шкале измерений составит  $\theta_0 = l_{OM_0} / \sigma$ . Для определенности и формирования отличий от термодинамики данный индекс  $\theta$  назван менсурой (от лат. *mensura* – мера) и задана соответствующая единица измерения в виде градуса менсуры  $^\circ M$ , который будет равен длине  $\sigma$  [58].

Проводя радиус-вектор  $\vec{r}$  до каждой точки  $M$  и определяя его модуль  $|\vec{r}|$ , можно в полученной шкале измерить состояние  $M$  в градусах менсуры (рис. 3.2). Если в качестве эмпирической меры выбирается евклидовое расстояние, то длины отрезков в многомерном пространстве будем определять по формуле:

$$l_{ab} = \sqrt{(z_{1b} - z_{1a})^2 + (z_{2b} - z_{2a})^2 + \dots + (z_{nb} - z_{na})^2}, \quad (3.14)$$

где  $a$  и  $b$  – начало и конец некоего отрезка  $ab$ .

При этом параметры свойств должны быть приведены к безразмерному виду или необходимо использовать одинаковые единицы измерения. Исходя из выше приведенного, для пространства состояний  $E^n$  можно искать модель в виде уравнения состояния:

$$\theta = f(z_1/z_{1_0}, z_2/z_{2_0}, \dots, z_n/z_{n_0}), \quad (3.15)$$

где величина  $\theta$  выражается в относительных единицах измерения.

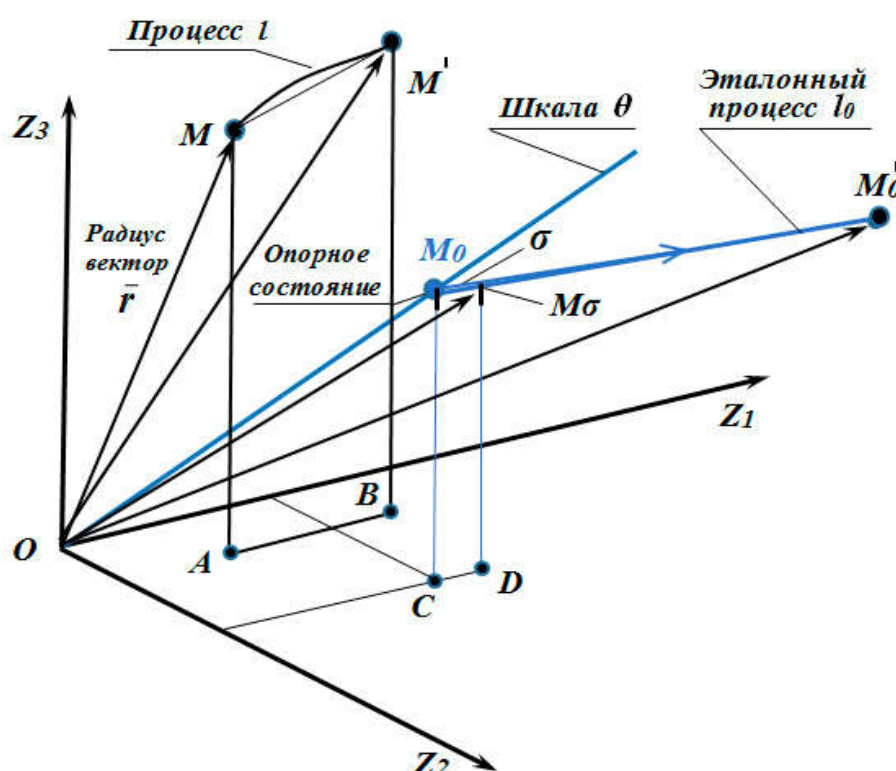


Рисунок 3.2 – Система построения шкалы для оценки состояний и процессов по отношению к опорному состоянию и эталонному процессу

В дальнейшем будем использовать и другие способы построения шкалы менсуры. Например, линейную шкалу  $\theta$  на основе эталонного процесса  $M_0M'_0$  можно создать, используя известные значения эмпирической меры  $W$ :  $\theta = 100 \frac{W - W_{M_0}}{W_{M'_0} - W_{M_0}}$ . Далее устанавливаем связь величины  $\theta$  с текущими состояниями опорного объекта для процесса  $M_0M'_0$ , которые выражаем через параметры свойств. Можно также предложить алгоритм определения значений  $\theta$  при изменении значений параметров свойств. С этой целью требуется построить линейную шкалу оценки состояний опорного объекта и применить ее для измерений, т.е. «создать» своего рода «алгоритмический термометр» для оценки состояний объектов в пространстве  $E^n$  по значениям величин  $z_k$ .

Если на основе опытных данных для объектов одного класса будет установлено общее уравнение вида (3.15), то в этом случае можно говорить о справедливости принципа соответственных состояний. Это дает возможность эмпирического обоснования понятия менсуры как особой функции, характеризующей состояния объектов в пространстве  $E^n$  по совокупности параметров. Исходя из уравнения (3.15), менсору можно определить как геометрическую (вероятностную, эмпирическую) меру отклонения состояния изучаемого объекта от опорного состояния, стандартизированного для изучаемого класса объектов. Единица менсуры может определяться в градусах, пунктах, балах и т.п. или в виде специально заданной единицы измерения. Все это дает возможность предложить несколько различных систем для измерения состояний объектов, а задача сравнения состояний сводится к выбору наиболее оптимальной шкалы измерения менсуры и адекватного способа определения соответствующей эмпирической меры.

Шкалу менсуры можно представить как систему сопоставимых числовых значений геометрических, вероятностных или эмпирических величин для оценки состояний объектов в пространстве  $E^n$ . Так как в этом пространстве каждому состоянию  $M$  однозначно ставится в соответствие значение эмпирической меры  $W$ , оцененное определенным образом, то по соглашению всегда можно выбрать способ определения длины отрезка  $M_0M'_0$  или меру сходства или подобия между состояниями  $M_0$  и  $M'_0$ .

Таким образом, при создании интегрированных шкал для оценки состояний объектов используем метрические методы шкалирования наподобие температурных шкал в термометрии.

Если для описания состояний объектов можно использовать понятие менсуры, которая комплексно характеризует каждое состояние и представляет собой функцию, зависящую от положения точки  $M$  (функция точки), то для описания процессов следует ввести понятие количества воздействия в виде функции линии. Представление о количестве воздействия было предложено А. Гухманом для характеристики различных взаимодействий [182]. При этом данная величина связана с процессом изменения состояния объекта и уровнем внешних воздействий на объект.

Будем считать, что количество воздействия однозначно характеризует процесс изменения состояния объекта  $l$ , может быть определено через некую эмпирическую величину  $Q_l$  и принятую по соглашению систему ее измерения [58]. Любое измерение заключается в сравнении измеряемой величины с другой, однородной с ней величиной, принятой за единицу. Рассмотрим некий процесс  $l$  в пространстве состояний  $E^n$  (рис. 3.2). Можно предложить множество способов задания величину  $Q_l$  по отношению к кривой  $l$ .

В случае, если построена шкала менсуры  $\theta$ , то для каждого состояния  $M$  на кривой процесса  $l$  может быть задана функция  $\theta = \theta_l(M)$ .

Поэтому, самый простой и наиболее правильный способ сравнения процессов между собой заключается в измерении площадей под кривыми процессов в координатах  $(\theta, \tau)$  в интервале между начальным и конечным состояниями. Критерий сходства может быть взят в виде отношения площадей  $Q_l = \frac{1}{\delta} \int_{\tau_0}^{\tau_1} \theta_l(\tau) d\tau$ . Здесь  $\delta$  равно площади под линией процесса

$M_0 M_\sigma$  в координатах  $(\theta, \tau)$ , которая будет, например, соответствовать изменению в один градус (или несколько градусов) менсуры для эталонного процесса  $M_0 M'_0$  вблизи первой опорной точки  $M_0$ . Соответствующие площади могут определяться интегрированием функции менсуры относительно параметра времени  $\tau$  с учетом длительности каждого процесса согласно (3.1). Если величина  $\theta$  описана вещественной функцией  $T$ , определяющей модель пространства состояний, то критерий сходства процессов можно задать в виде отношения площадей  $Q_l = \frac{1}{\delta} \int_{\tau_0}^{\tau_1} T_l(\tau) d\tau$ .

В случае, когда менсура привязана не ко времени, а к длине кривой процесса  $l$ , количество воздействия, как функцию линии, можно определить через криволинейный интеграл от менсуры  $\theta$  по кривой процесса  $l$ . Критерий сходства может быть взят в виде отношения  $Q_l = \frac{1}{\delta} \int_l \theta(\varepsilon) d\varepsilon$ , где  $d\varepsilon$  – дифференциал дуги кривой  $l$ .

Таким образом, рассматриваем количество воздействия как эмпирическую величину  $Q_l$  применительно к опытным данным в пространстве  $E^n$ , которая будет отражать динамику процессов изменения состояния объектов как многомерных кривых.

Полученные результаты позволяют для данных наблюдений установить связь между изменениями количества воздействия и менсуры в

различных процессах. Для этого используем величину  $c_l$ , определяемую на основе данных опыта, и которая по аналогии с понятием теплоемкости процесса в термодинамике, названа темпоральностью процесса изменения состояния объекта (*темпоральность* / англ. *tempora* – временные особенности / – временная сущность процесса, порожденная динамикой его особенного движения). В общем случае, величина  $c_l$  будет отражать интенсивность протекания процессов изменения состояния объектов при их взаимодействии с окружающей средой [58].

Будем считать, что в окрестности любой точки  $M$  при бесконечно малом изменении состояния в каком-либо процессе  $l$  темпоральность  $c_l$  характеризует связь между величинами  $Q_l$  и  $\theta$ . Определим  $c_l$  как величину, равную отношению элементарного приращения величины  $Q_l$  к соответствующему приращению величины  $\theta$  в процессе  $l$ :

$$c_l = \frac{dQ_l}{d\theta_l}. \quad (3.16)$$

Исходя из принятых допущений, величина  $c_l$  зависит как от положения точки  $M(z_1, z_2, \dots, z_n)$ , так и от направления процесса  $l$  в пространстве состояний. В термодинамике величина  $c_l$  называется теплоемкостью и имеет большое значение, т.к. привносит в теорию опытные факты и эмпирические закономерности, характерные для реальных процессов.

Далее индекс  $l$  будем относить только к величине  $c_l$ , а для остальных переменных, с целью упрощения обозначений, его будем опускать. Таким образом, между различными эмпирическими величинами, характеризующими как состояния, так и процессы изменения состояний, можно на основе опытных данных искать связи в виде уравнения (3.16).

Сформулированные подходы позволяют предложить способы измерения менсуры и количества воздействия в различных процессах изменения состояний объектов на основе имеющихся темпоральных данных. Особо отметим, что задача сравнения между собой как состояний, так и процессов сводится к выбору оптимальных систем измерения величин. Построение систем измерения для различных классов объектов в дальнейшем будет проиллюстрировано конкретными примерами.

Теперь сформулируем основные положения интегрированного метода измерения состояний объектов на основе эмпирических данных, а также метода сравнения состояний объектов на основе вероятностей индикативных событий.

### **3.4 Математические зависимости и критерии для анализа состояний и процессов развития урбанизированных территорий**

Для построения феноменологических моделей используем описанный выше подход моделирования состояний и процессов их изменения для систем различной природы. Для моделирования состояний систем различной природы используем следующие постулаты [58].

1. Пусть в пространстве состояний  $E^n$  для некоторого класса объектов каждой точке  $M$  поставлено в соответствие действительное число  $\theta$ , которое будем называть менсурой состояния.

2. Величина  $\theta = \theta(M)$  является функцией точки и образует скалярное поле, которое является непрерывным в области  $E^n$ .

Предположим, что по соглашению принята система измерения менсуры  $\theta$ . Данная величина непосредственным образом зависит от эмпирической меры сходства состояний объектов  $W$ .

Для построения модели описания процессов в пространстве  $E^n$  используем гипотезу, что скалярное поле менсуры может быть математически описано в окрестности точки  $M$ . Сделаем предположение, что в области  $E^n$  с учетом эмпирических данных можно задать некую вещественную функцию  $T(z_1, z_2, \dots, z_n)$ , на основе которой будет формироваться математическая модель, которую далее будем называть средой моделирования (моделью пространства состояний). Пусть также в окрестности точки  $M$  существует связь между величинами  $T$  и  $\theta$  вида:  $\theta = T(z_1, z_2, \dots, z_n)$  или  $\theta = T(z_1, z_2, \dots, z_n) + const$ .

Предположим, что через произвольную точку  $M$  осуществляется некий процесс изменения состояния объекта  $l$ . Для построения феноменологической модели используем третий и четвертый постулаты [58].

3. Пусть в пространстве состояний  $E^n$  каждому процессу  $l$ , проходящему через точку  $M$ , ставится в соответствие эмпирическая величина  $Q$ , которую будем называть количеством воздействия. Данная величина является функцией процесса и определяется в опыте.

4. Для всего многообразия кривых, проходящих через произвольную точку  $M$ , изменения величин  $Q$  и  $\theta$  однозначно связаны между собой, при этом для любого элементарного отрезка линии процесса  $l$  справедливо соотношение  $dQ = c_l d\theta$ , где  $c_l$  – эмпирические величины, которые определяются по результатам опыта. Эти величины будем называть темпоральностями процесса  $l$ .

Пусть через точку  $M$  осуществляется элементарный процесс, в результате которого состояние некоего объекта изменяется от начального  $M$  до конечного состояния  $M'$  (рис. 3.1). Тогда элементарное приращение количества воздействия  $Q$  представим в виде:

$$dQ = \frac{\partial Q}{\partial z_1} dz_1 + \frac{\partial Q}{\partial z_2} dz_2 + \dots + \frac{\partial Q}{\partial z_n} dz_n. \quad (3.17)$$

Из соотношения  $dQ = c_l d\theta$  и принятой связи полевой величины  $\theta$  со скалярной функцией  $T$ , следует, что:

$$\left(\frac{\partial Q}{\partial z_1}\right) = c_1 \left(\frac{\partial T}{\partial z_1}\right); \quad \left(\frac{\partial Q}{\partial z_2}\right) = c_2 \left(\frac{\partial T}{\partial z_2}\right); \dots; \left(\frac{\partial Q}{\partial z_n}\right) = c_n \left(\frac{\partial T}{\partial z_n}\right), \text{ откуда}$$

$$dQ = c_1 \left(\frac{\partial T}{\partial z_1}\right) dz_1 + c_2 \left(\frac{\partial T}{\partial z_2}\right) dz_2 + \dots + c_n \left(\frac{\partial T}{\partial z_n}\right) dz_n, \quad (3.18)$$

где  $c_k$  – темпоральности процессов изменения состояния объектов, соответствующие переменным состояниям  $z_1, z_2, \dots, z_n$  и являющиеся функциями этих переменных.

Как показано в работе [58], многомерная форма Пфаффа (3.18) интегрируема в области  $E^n$  и для сред моделирования в виде однородных, мультипликативных и экспертных функций. Например, простые функции (3.7) – (3.12) и получение теоретических зависимостей связано с решением уравнения в частных производных вида:

$$\frac{z_1}{c_1} \frac{\partial Q}{\partial z_1} + \frac{z_2}{c_2} \frac{\partial Q}{\partial z_2} + \dots + \frac{z_n}{c_n} \frac{\partial Q}{\partial z_n} = \beta T, \quad (3.19)$$

где  $\beta$  – константа, определяемая видом функции  $T = T(z_1, z_2, \dots, z_n)$ .

Данное уравнение является линейным неоднородным уравнением в частных производных первого порядка. Решение уравнения (3.19) методом характеристик, когда характеристики определяются системой обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\beta c_1 \frac{dz_1}{z_1} = \beta c_2 \frac{dz_2}{z_2} = \dots = \beta c_n \frac{dz_n}{z_n} = \frac{dQ}{T} = ds, \quad (3.20)$$

позволяет получить зависимости для параметра характеристики  $s$ .

В работах [28, 58] показано, что из уравнений (3.20) легко определяются зависимости вида  $ds = c_1 \frac{dz_1}{z_1} + c_2 \frac{dz_2}{z_2} + \dots + c_n \frac{dz_n}{z_n}$ , которые по структуре совпадают с известным уравнением для энтропии, поэтому

величину  $s$  определим как эмпирическую энтропию состояния в пространстве  $E^n$ .

Известно, что семейство поверхностей, ортогональных характеристикам (3.19), определяется из скалярного произведения вектора

$$\vec{F} = \frac{z_1}{c_1} \mathbf{e}_1 + \frac{z_2}{c_2} \mathbf{e}_2 + \dots + \frac{z_n}{c_n} \mathbf{e}_n \quad (3.21)$$

и единичного вектора  $\mathbf{e} = \mathbf{e}_1 dz_1 + \mathbf{e}_2 dz_2 + \dots + \mathbf{e}_n dz_n$ , а именно  $(\vec{F} \cdot \mathbf{e}) = 0$ .

Из последнего соотношения вытекает многомерное уравнение Пфаффа:

$$\frac{z_1}{c_1} dz_1 + \frac{z_2}{c_2} dz_2 + \dots + \frac{z_n}{c_n} dz_n = 0, \quad (3.22)$$

которое приводится к полному дифференциалу. Исходя из этого, существует потенциал  $P(z_1, z_2, \dots, z_n) = C$  пространства  $E^n$ , который можно представить в виде семейства поверхностей, ортогональных линиям энтропии.

Для функций  $T$  в виде меры относительных изменений (3.7) и в виде геометрической вероятности (3.12) зависимости для энтропии и потенциала пространства  $E^n$  имеют вид:

$$s - s_0 = c_1 \ln \left( \frac{z_1}{z_{1_0}} \right) + c_2 \ln \left( \frac{z_2}{z_{2_0}} \right) + \dots + c_n \ln \left( \frac{z_n}{z_{n_0}} \right); \quad (3.23)$$

$$P - P_0 = \frac{1}{2} \left( \frac{z_1^2 - z_{1_0}^2}{c_1} + \frac{z_2^2 - z_{2_0}^2}{c_2} + \dots + \frac{z_n^2 - z_{n_0}^2}{c_n} \right), \quad (3.24)$$

где  $z_{1_0}, z_{2_0}, \dots, z_{n_0}$  – значения параметров опорного состояния.

Для функций  $T$  в виде простой или взвешенной суммы (3.10), (3.11) и евклидового расстояния (3.8) соответствующие зависимости имеют вид:

$$s - s_0 = \frac{c_1}{n} \ln \left( \frac{z_1}{z_{1_0}} \right) + \frac{c_2}{n} \ln \left( \frac{z_2}{z_{2_0}} \right) + \dots + \frac{c_n}{n} \ln \left( \frac{z_n}{z_{n_0}} \right); \quad (3.25)$$

$$P - P_0 = \frac{1}{2} \left( \frac{z_1^2 - z_{1_0}^2}{c_1} + \frac{z_2^2 - z_{2_0}^2}{c_2} + \dots + \frac{z_n^2 - z_{n_0}^2}{c_n} \right). \quad (3.26)$$

Из уравнений для характеристик (3.20) вытекает также соотношение, которое связывает между собой количество воздействия  $Q$  с эмпирической энтропией  $s$  и скалярной функцией  $T$  в любом процессе изменения состояний:

$$ds = \frac{dQ}{T}. \quad (3.27)$$

Величина энтропии  $s$  является характеристической функцией пространства состояний  $E^n$ . Как следует из уравнений для характеристик, в параметрическом представлении энтропия является длиной дуги векторной линии непрерывного векторного поля, которое соответствует уравнению (3.19), характеризующему континуальное пространство состояний. Потенциал  $P$  пространства  $E^n$  выступает в качестве одной из мер по отношению к количественной и качественной определенности соответствующего класса объектов.

Таким образом, использованы понятия энтропии и потенциала как характеристик, связанных со скалярным полем менсуры, которая описывает качественные изменения в системе с учетом сходства состояний объектов.

Из проведенных исследований вытекают следующие общие следствия.

Каждый класс объектов, для континуального пространства состояний которого существует менсура как полевая величина, характеризующая сходство состояний, обладает [58]:

- характеристической функцией пространства состояний, называемой эмпирической энтропией  $s$ , которая является криволинейной координатой данного пространства;

- характеристической функцией пространства состояний в виде поверхности уровня, ортогональной линиям энтропии, которую можно назвать потенциалом  $P$  данного пространства.

На содержательном уровне менсору можно определить как меру качественных изменений состояний в некоем аспекте качественных признаков. При этом любое множество качественно одинаковых состояний класса объектов, которое оценивается по некой мере сходства, однозначно будет определяться условием:  $d\theta = 0$ ,  $(\theta = const, dQ \neq 0)$ .

В свою очередь, на содержательном уровне энтропию можно определить как меру качественных и количественных изменений при совершении процессов, когда количество воздействия на объект остается постоянным:  $dQ = 0$ ,  $(s = const, ds = 0)$ . При этом любой процесс в пространстве состояний может характеризоваться изменением количества воздействия и энтропии, исходя из соотношения  $dQ = T ds$ .

Потенциал также можно определить как меру качественных и количественных изменений в пространстве состояний  $E^n$ , когда определяется область количественных изменений, которые могут происходить при сохранении данного качества объекта, при этом для пространства состояний справедливо соотношение  $\vec{F}(z_1, z_2, \dots, z_n) = grad(P)$ .

Также отметим, что возможность описания континуального пространства состояний того или иного класса объектов полностью определяется существующими опытными данными и справедливость используемых гипотез может быть проверена на массивах этих данных.

Менсура  $\theta$ , энтропия  $s$  и потенциал  $P$  могут быть приняты в качестве интегральных критериев для описания состояний объектов и процессов их изменения в многомерном пространстве  $E^n$ . Данные величины являются полевыми переменными. Важной особенностью энтропии и потенциала является то, что они представляют собой функции состояния при

справедливости условия существования непрерывного скалярного поля менсуры. Изменение данных функций зависит только от состояния объектов и не зависит от пути «перехода» объектов между этими состояниями.

### **3.5 Методика комплексных измерений и анализа состояний сложных систем**

Сформулируем методические принципы обработки и анализа темпоральных массивов данных для получения феноменологических закономерностей при анализе сложных систем. Предполагается, что такие закономерности могут иметь общий характер, их получение возможно для объектов различной природы и основных типов хранимых данных, характеризующих эти объекты.

В темпоральных массивах обычно хранятся многомерные данные. В данном случае под многомерными данными будем понимать массивы данных темпоральной структуры, в которых число объектов может составлять несколько тысяч и более, количество параметров – до сотни, а число таблиц, привязанных к моментам времени, – несколько тысяч.

Формирование массивов данных для анализа изначально требует исключительно трудоемкой работы. Многомерные данные можно получить там, где имеются стандартизованные методики сбора и обработки данных, применяются различные модели для оценки их точности и достоверности, а также используются методы сглаживания, описания и ассимиляции данных и т.д. В некоторых прикладных областях подобные данные существуют или могут быть получены. На базе таких данных возможно создание феноменологических моделей, учитывающих основные закономерности развития и функционирования объектов.

Исходя из вышеприведенного, общая методика получения уравнений состояний и феноменологических зависимостей для различных классов объектов в каждом конкретном случае включает следующие этапы:

- составляется база данных в форме структурированного массива темпоральных данных, для чего проводится сбор, обработка и анализ различной информации в области предмета исследования. Массив данных формируется в виде двумерных таблиц «объекты–параметры свойств», причем множество таблиц упорядочено по времени с определенным шагом (рис. 3.1.) Все ячейки массива должны быть заполнены количественной информацией, при отсутствии значений параметров проводится интерполяция или экстраполяция данных различными методами;

- формируется перечень параметров, которые в дальнейшем будут выступать в качестве переменных состояния. Задачей данного этапа является выбор из всего перечня параметров обоснованной системы переменных, с использованием которых возможна полная и достоверная характеристика состояний изучаемых систем. Эти переменные определяются сложившимися в научном сообществе представлениями о функционировании или поведении изучаемых систем, литературными данными, имеющимися базами данных, корреляционным анализом информации или другими методами установления наиболее значимых переменных. При изучении различных аспектов развития систем с целью эффективности анализа информации обработка данных и поиск закономерностей будут осуществляться по группам из трех – семи переменных состояния. При этом необходимо стремиться к тому, чтобы используемые переменные состояния отличались информативностью, значимостью и вариабельностью, и в совокупности были достаточны для качественной характеристики состояний объектов в определенном аспекте;

- создается многомерное пространство состояний для изучаемого класса объектов (рис. 3.1). На данном этапе принимается гипотеза о существовании эмпирических мер как качественных характеристик

состояний объектов или процессов изменения их состояний. Осуществляется выбор эмпирических мер (раздел 3.2), а также разработка систем количественного определения этих величин. С этой целью строится или выбирается процесс, который может выступать в качестве эталонного процесса в пространстве состояний. Задаются опорные точки для построения линейной шкалы менсуры для относительного сравнения состояний объектов между собой. Изучаются различные варианты построения системы измерения данной величины и выбираются наиболее оптимальные системы измерений исходя из различных эмпирических мер;

- производится измерение состояний объектов по созданной шкале и находятся соответствующие значения менсуры. На данном этапе устанавливаются регрессионные зависимости в виде уравнений состояния, отражающие связи менсуры с переменными состояниями. Это один из наиболее трудоемких этапов исследования, так как требуется проведение значительного числа вариантных расчетов для различных перечней переменных состояний и разных эмпирических мер. Качество и точность разработанных моделей проверяется путем проверки статистических гипотез и сравнения расчетных результатов с имеющимися данными. По полученным моделям делается вывод о справедливости принципа соответственных состояний;

- в случае справедливости принципа соответственных состояний предлагаются эмпирические величины, которые позволяют в многомерном пространстве состояний сравнивать между собой различные процессы изменения состояний объектов. Выбирается эмпирическая величина и формулируется оптимальная система ее измерения. В принятой системе измерения определяются значения данной величины. Устанавливаются соответствующие феноменологические зависимости для описания динамики данных в изучаемой предметной области и оценивается их качество и точность;

- согласно соотношения  $dQ = c_l d\theta$  для каждого экземпляра класса находится темпоральность  $c_l$  наблюдаемых процессов для кривых в целом или участков кривых, описывающих процессы. На основе зависимости  $ds = dQ/\theta$  строится шкала энтропии и находятся зависимости для энтропии;

- далее формулируются гипотезы, позволяющие предложить теорию описания данных, обосновывается используемый математический аппарат и разрабатываются основные положения теории для описания данных, характеризующих определенный класс объектов. При выполнении данного этапа изучаются особенности класса объектов и формулируются модели пространства состояний на основе задания непрерывной скалярной функции  $T = T(z_1, z_2, \dots, z_n)$ . Данная функция определяет среду моделирования для изучаемого вида систем. На основе полученных результатов находится энтропия  $s$  и потенциал  $P$  состояний объектов в процессе их изменения в многомерном пространстве  $E^n$  (раздел 3.4). Предлагаются основные положения теории описания данных в изучаемой предметной области. Полученные результаты позволяют проводить комплексное ранжирование объектов по совокупности показателей, осуществлять прогнозирование процессов развития однотипных систем и изучать возможные сценарии их развития.

Таким образом, задача создания системно-феноменологических теорий в предметных областях сводится к построению моделей описания данных для отдельных проблемно-ориентированных массивов данных, имеющих многомерную темпоральную структуру. В этом случае на основе предлагаемого метода и разработанных зависимостей возможно проведение анализа и прогнозирования состояний объектов, а также их параметров.

### 3.6 Разработка алгоритмов оценки параметров урбанизированных территорий

Основная проблема комплексной оценки природно-технических систем и урбанизированных территорий связана с созданием количественных шкал для измерения состояний объектов в многомерных пространствах переменных и разработкой алгоритмических операций для процессов измерений. Уравнения состояния относительно качеств объектов можно получить, применяя общепринятую теорию измерений по отношению к конкретной предметной области [184]. В целом теория измерений в конкретной предметной области представляет собой систему квалитетрического перехода от качественных оценок состояний к соответствующим количественным оценкам.

Процедура построения количественных шкал досконально проработана в физике и, в частности, в термодинамике и метрологии [182–185], где обычно применяются шкалы интервалов и отношений.

В дальнейшем все измерения проводились на основе построения интервальной шкалы (шкала  $M_0M'$ , рис. 3.2) и шкалы отношений величины  $\theta$ . При построении шкал для сравнения состояний объектов и процессов их развития использовали общепринятый в теории измерений подход.

Наиболее важным при построении шкал измерения является процедура выбора эталонного объекта, который должен удовлетворять условиям линейности процесса своего развития в многомерном пространстве. Путем перебора всех экземпляров класса в качестве эталонного выбирался объект, который более всего соответствует этому условию [186]. В целом процедура выбора эталонного объекта, эталонного процесса и опорных состояний заключалась в следующем.

В пространстве  $E^n$ , охватывающем все наблюдаемые состояния исследуемых объектов, состояние каждого из объектов характеризуется значениями переменных состояния  $z_{1,i,l}, z_{2,i,l}, \dots, z_{n,i,l}$  и в каждый момент времени  $i$  ( $i \in [G_n, G_k]$ ) отображается точкой  $M_{i,l} = (z_{1,i,l}, z_{2,i,l}, \dots, z_{n,i,l})$ . Перебор разных групп переменных позволяет изучать объекты и процессы их развития в различных аспектах. В свою очередь, расчеты во времени (например, по годам) позволяют оценить тенденции и закономерности развития соответствующих объектов.

Расстояние между двумя состояниями одного и того же объекта за определенный период времени геометрически можно рассматривать как прямой отрезок между двумя соответствующими точками  $M$  и  $M'$  (рис. 3.2). Естественно, что реальный процесс (процесс  $l$ , рис. 3.2) будет отображаться за этот же период времени некой кривой. Таким образом, задача выбора эталонного объекта и эталонного процесса развития объектов сводится к нахождению кривой развития  $l$ , которая имеет наименьшую погрешность отклонения реальных состояний на этой кривой от состояний, которые принадлежат прямой линии  $MM'$ .

Таким образом, при разработке алгоритма для каждого объекта и четко заданного периода времени между состояниями  $M$  и  $M'$  строим уравнение многомерной прямой, которая определяется известной зависимостью.

Первое опорное состояние для  $k$ -того объекта  $M_k$  соответствует начальному времени сбора данных статистических наблюдений, а второе опорное состояние  $M'_k$  – последнему времени сбора данных. В этом случае уравнение многомерной прямой в параметрическом виде представляется следующим образом:

$$\frac{z_{Gi\_1} - z_{Gn\_1}}{z_{Gk\_1} - z_{Gn\_1}} = \frac{z_{Gi\_2} - z_{Gn\_2}}{z_{Gk\_2} - z_{Gn\_2}} = \frac{z_{Gi\_3} - z_{Gn\_3}}{z_{Gk\_3} - z_{Gn\_3}} = \dots = \frac{z_{Gi\_n} - z_{Gn\_n}}{z_{Gk\_n} - z_{Gn\_n}} = t \quad (3.28)$$

Здесь  $z_{Gi\_1}$  – значение 1-й переменной состояния за  $i$ -ый момент времени (год, месяц и т.д.) ( $i \in [Gn - 1; Gk - 1]$ );  $z_{Gi\_2}$  – значение 2-й переменной состояния за  $i$ -ый момент;  $z_{Gk\_1}$  – значение 1-й переменной состояния за последний (конечный) момент;  $z_{Gn\_1}$  – значение 1-й переменной состояния за начальный момент. Первое опорное состояние при построении прямой соответствует начальному времени сбора данных –  $M(z_{Gn\_1}, z_{Gn\_2}, \dots, z_{Gn\_n})$ , а второе опорное состояние конечному времени сбора данных –  $M'(z_{Gk\_1}, z_{Gk\_2}, \dots, z_{Gk\_n})$ .

В соответствии с алгоритмом, представленным на рисунке 3.3, опираясь на уравнение многомерной прямой (3.28), по значению 1-й переменной состояния (т.е.  $j=1$ ) определяем значения параметра  $t_{i,l}$  по формуле (3.29):

$$t_{i,l} = \frac{z_{i,j,l} - z_{Gn,j,l}}{z_{Gk,j,l} - z_{Gn,j,l}}, \quad (\text{при } j=1). \quad (3.29)$$

Здесь  $t_{i,l}$  – параметр линейного уравнения, заданного в параметрическом виде;  $z_{i,j,l}$  – значение  $j$ -й переменной состояния за  $i$ -ый момент времени ( $i \in [Gn - 1; Gk - 1]$ ) для  $l$ -ого объекта исследования;  $G_n$  – начальный момент сбора данных;  $G_k$  – конечный момент сбора данных.

Затем на основе полученных данных  $t_{i,l}$  пересчитываем значения показателей  $z'_{i,j,l} = t_{i,l} \cdot (z_{Gk,j,l} - z_{Gn,j,l}) + z_{Gn,j,l}$  для случая линейной зависимости при  $j \in [2, n]$ , где  $n$  – количество показателей. Далее определяем ошибку отклонения кривой развития процесса от прямой по всем переменным:

$$\sigma_{i,l} = \frac{\sum_{j=2}^n (z_{i,j,l} - z'_{i,j,l})^2}{n-1}.$$

Осуществляя цикл расчетов по всем годам  $i \in [G_{n+1}, G_{k-1}]$  и всем объектам, находим ошибку отклонения кривой развития процесса от прямой для каждого объекта исследования:

$$\sigma_l = \frac{\sum_{i=G_n+1}^{G_k-1} \sigma_{i,l}}{k-2}.$$

Процедура ранжирования объектов по минимальному значению  $\sigma_l$  позволяет выбрать эталонный объект с минимальным отклонением кривой процесса развития от многомерной прямой линии.

Соответствующая блок-схема алгоритма приведена на рисунке 3.3.

На основе приведенной блок-схемы алгоритма была разработана соответствующая подпрограмма выбора эталонного объекта.

Вся обработка данных проводилась в статистике. Система *Statistica* дает возможность создавать и подключать макросы, написанные на языке программирования *Statistica Visual Basic*.

Это встроенный язык программирования среды *Statistica*, позволяющий пользоваться преимуществами архитектуры *Statistica* и создавать макросы как во встроенной среде программирования, так и подключать программы, написанные на *Visual Basic* других приложений.

Данный макрос представляет собой подпрограмму, которая принимает на вход в качестве аргументов размеры и расположение темпоральных данных в таблицах (строку и столбец, с которых надо считывать данные, а также количество строк и столбцов).

Затем из всех открытых в *Statistica* таблиц считываются данные. Вычисляются значения  $t$ ,  $z'$ ,  $\sigma_i$  и  $\sigma$ . Данные операции повторяются для каждой таблицы.

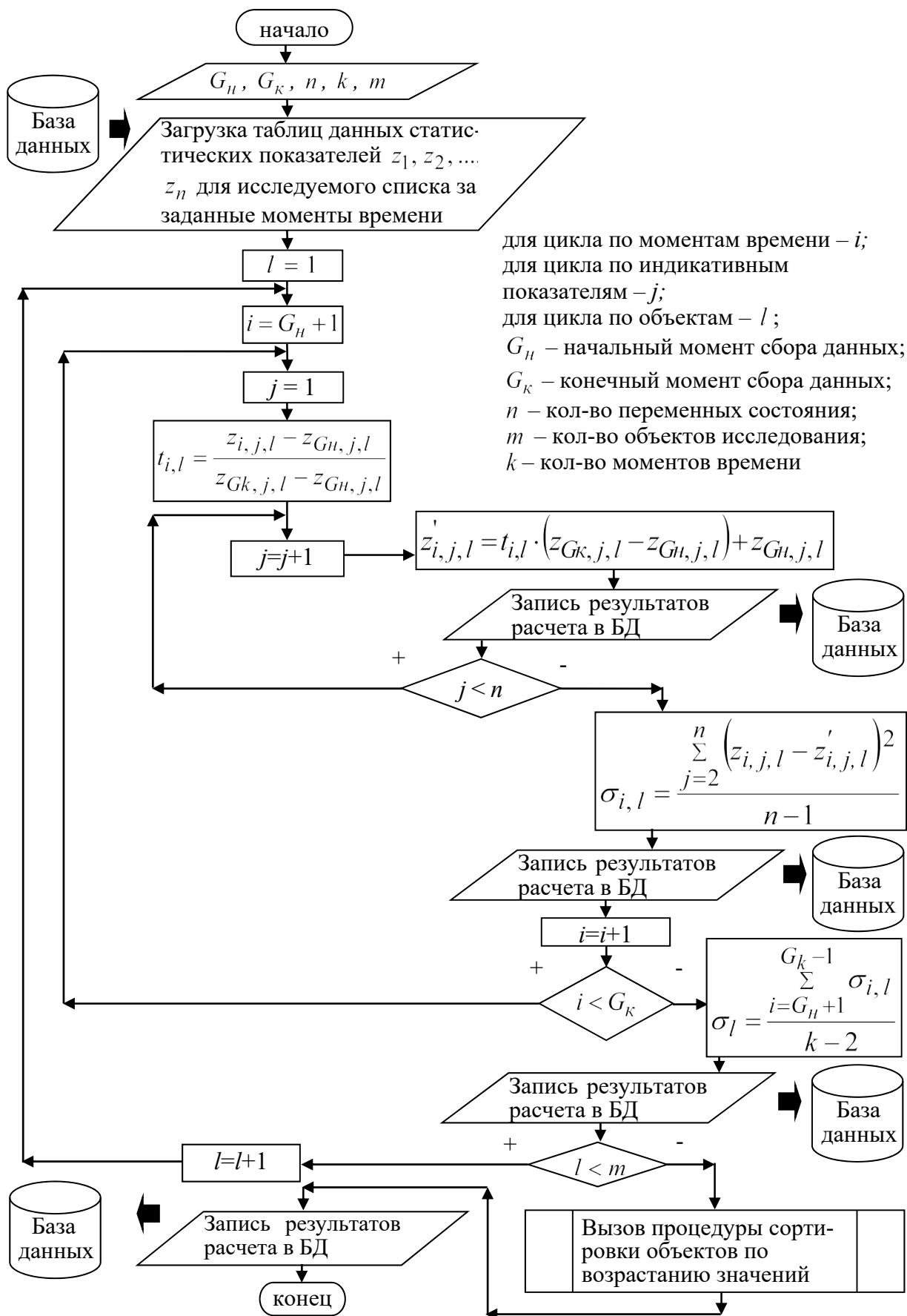


Рисунок. 3.3 – Блок-схема алгоритма выбора эталонного процесса

Промежуточные данные сохраняются в отдельные таблицы, которые после обработки макроса открываются в *Statistica*. Также в отдельную таблицу сохраняются отсортированные коэффициенты  $\sigma$ . Так как предполагается, что самих открытых таблиц не так много, выбор вида сортировки не принципиален. Поэтому была реализована сортировка выбором.

Макрос содержит два цикла для чтения данных, один цикл для вычисления  $t$ ,  $z'$ ,  $\sigma_i$  и  $\sigma$ , два цикла для вычисления  $z'$ . Также один общий цикл для прохода по всем таблицам и повторения вышеописанных вычислений для каждой из таблиц. И, наконец, три цикла для открытия новых таблиц и заполнения в них ячеек необходимыми данными.

Макрос позволяет не обращаться к каждой таблице по отдельности, и организует вычисления сразу для всех таблиц, а сортировка итоговых показателей позволяет расположить объекты в порядке возрастания (или убывания) по критерию оценки условия линейности процессов развития объектов в многомерном пространстве переменных состояния.

Данный макрос работает независимо от типа данных, его можно применять для расчёта коэффициента линейности любых показателей. Макрос использовался при выборе опорных объектов применительно к тому или иному классу объектов и приведен в Приложении Б.

При построении измерительных шкал  $\theta$  для оценки меры сходства состояний и реализации процесса измерения состояний объектов используются расчетные зависимости, представленные в разделе 3.4. При создании моделей групповой статистики объектов (для одной таблицы данных) или динамики объектов (для двух и более таблиц данных) в виде уравнений состояния используются полученные выше расчетные данные и модуль «*Statistica*» *Multiple Regression*. Выбор наиболее оптимальных уравнений и шкал измерения, исходя из качества полученных уравнений состояния, проводится в диалоговом режиме путем выполнения

вариативных расчетов для различных изучаемых периодов времени. При ранжировании объектов по интегральным критериям используются расчетные зависимости разделов 3.3–3.4 и модуль «*Statistica*» *Sort* для определения рангов.

Вариативные расчеты выполняются для различных периодов времени, различных перечней переменных состояния, принятых для квалиметрической оценки, а также при выполнении процедур оценки состояний и процессов развития объектов и их рангов по отношению к выбранному эталонному объекту, контрольной группе или группе аналогов (близких по уровню развития объектов).

### **3.7 Примеры комплексной оценки состояний систем и объектов**

С использованием предложенных методов и средств на основе обработки и анализа имеющихся данных получены феноменологические модели для некоторых классов объектов и урбанизированных территорий [28, 58]. Приведем в качестве примеров процесс построения таких моделей.

#### *1) Биологические объекты.*

Рассмотрим класс биологических объектов, в который входят все позвоночные животные. Будем использовать известную базу данных AnAge [187] для получения уравнений состояний биологических видов позвоночных животных. Для примера в виде переменных состояния используем следующие величины из базы AnAge:

- максимальная продолжительность жизни в неволе  $z_1$ , лет;
- вес взрослой особи  $z_2$ , кг;
- уровень метаболизма  $z_3$ , Вт.

Количество анализируемых видов – 546. В качестве первого опорного состояния (точка  $M_0$ ) при построении линейной шкалы менсуры

выберем биологическое состояние вида домовая мышь (*Mus musculus*), которая является наиболее изученным модельным животным. Значения параметров для точки  $M_0$  равны  $z_1 = 4$  года;  $z_2 = 0,0205$  кг;  $z_3 = 0,271$  Вт.

В качестве второй опорной точки  $M'_0$  примем биологическое состояние вида серая крыса (*Rattus norvegicus*). Данный вид находится в стадии расцвета и разводится в большом количестве в качестве домашних и лабораторных животных. Значения параметров для точки  $M'_0$  равны  $z_1 = 3,8$  лет;  $z_2 = 0,300$  кг;  $z_3 = 1,404$  Вт. При анализе данных будем использовать приведенные переменные  $z_1, z_2, z_3$ , отнесенные к значениям первого опорного состояния.

Построим прямую линию между состояниями  $M_0$  и  $M'_0$ , определим длину отрезка  $M_0M'_0$  и разобьём его на 100 равных частей. В результате имеем эталон одной единицы сходства состояний. Эта единица в виде градуса  $1^\circ M$  равна длине  $\sigma$  элементарного отрезка.

При анализе данных в качестве эмпирической меры принято евклидовое расстояние по отношению к опорному объекту, в качестве среды моделирования – функция меры относительных изменений. Шкала менсуры  $\theta$  была построена с учетом результатов раздела 3.3.

После выполненных операций получено уравнение состояний биологических видов животных для переменных  $z_1, z_2, z_3$  в виде:

$$\ln \theta = 5,779 + s; \quad s = 0,951 \ln \left( \frac{z_1}{z_{1_0}} \right) + 0,064 \ln \left( \frac{z_2}{z_{2_0}} \right) + 0,041 \ln \left( \frac{z_3}{z_{3_0}} \right). \quad (3.30)$$

Коэффициент множественной корреляции зависимости составил 0,96, результаты обработки данных приведены на рисунке 3.5.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о справедливости принципа соответственных состояний для изучаемого класса объектов.

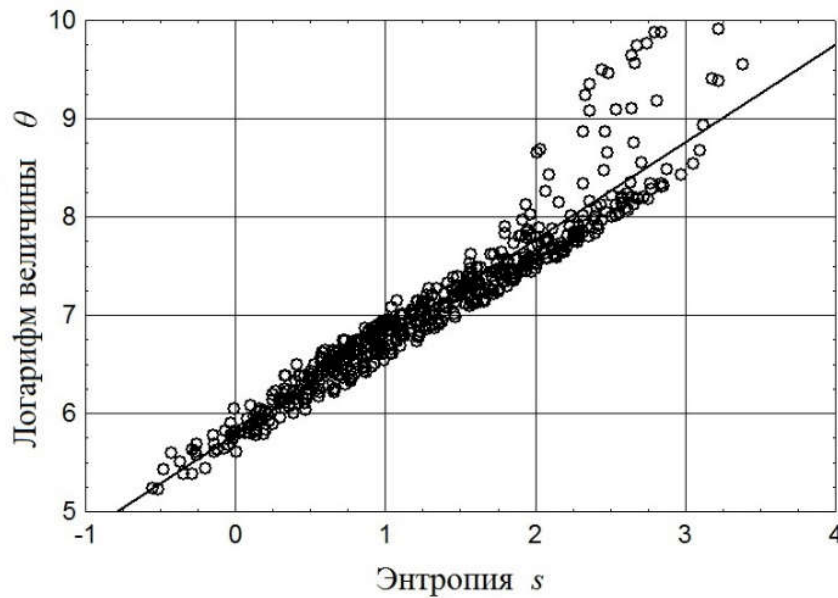


Рисунок 3.5 – Представление данных о состоянии биологических видов для переменных  $z_1, z_2, z_3$ , энтропия  $s$  определена в соответствии с (3.30)

## 2) Социально-экономические объекты – Регионы России.

Теперь рассмотрим несколько классов объектов, состояния которых изменяются с течением времени. Изучим регионы России, используя при анализе существующие базы данных [188]. В процессе обработки данных будем использовать различные подходы при оценке сходства состояний объектов и различные перечни переменных состояния.

Для исследований была сформирована статистическая база данных социально-экономических показателей субъектов Российской Федерации. Она включала информацию по каждому из 80 регионов для 48 показателей за 17 лет (с 2002 по 2018 гг.).

### 2.1. Геометрический подход

Для примера выберем для анализа данных в качестве переменных состояния семь удельных показателей развития, характеризующих сектор реальной экономики:

- объем товаров собственного производства, выполненных работ и услуг собственными силами:

- добыча полезных ископаемых  $z_1$ ;
- обрабатывающие производства  $z_2$ ;
- производство и распределение энергии, газа и воды  $z_3$ ;
- продукция сельского хозяйства  $z_4$ ;
- объем работ в строительстве  $z_5$ ;
- объем платных услуг населению  $z_6$ ;
- оборот розничной торговли  $z_7$ .

Размерность всех перечисленных величин – млн руб./тыс. чел. (тыс. руб./чел.). В качестве опорных состояний (точки  $M_0$  и  $M'_0$ ) при построении измерительной шкалы выбраны состояния Белгородской области в 2012 и 2015 годах. В данном случае при анализе данных за эмпирическую меру принято евклидовое расстояние по отношению к опорному объекту, в качестве среды моделирования – функция меры относительных изменений.

Уравнения состояния для 80 регионов России получены в виде регрессионных зависимостей (3.31)–(3.33) с высокими коэффициентами корреляции (0,96–0,98). Результаты обработки данных представлены на рисунках 3.6, 3.7.

- для 2012 года:  $\ln \theta = 4,041 + s$ ;

$$s = 0,083 + \frac{z_1}{z_{1_0}} + 0,755 \frac{z_2}{z_{2_0}} + 0,086 \frac{z_3}{z_{3_0}} + 0,508 \frac{z_7}{z_{7_0}}; \quad (3.31)$$

- для 2015 года:  $\ln \theta = 4,364 + s$ ;

$$s = 0,080 + \frac{z_1}{z_{1_0}} + 0,6125 \frac{z_2}{z_{2_0}} + 0,455 \frac{z_7}{z_{7_0}}; \quad (3.32)$$

- для 2018 года:  $\ln \theta = 4,404 + s$ ;

$$s = 0,054 + \frac{z_1}{z_{1_0}} + 0,460 \frac{z_2}{z_{2_0}} + 0,068 \frac{z_3}{z_{3_0}} + 0,123 \frac{z_4}{z_{4_0}} + 0,362 \frac{z_7}{z_{7_0}}. \quad (3.33)$$

Хорошее качество уравнений позволяет сделать вывод о справедливости принципа соответственных состояний для регионов России при их оценке по показателям реальной экономики.

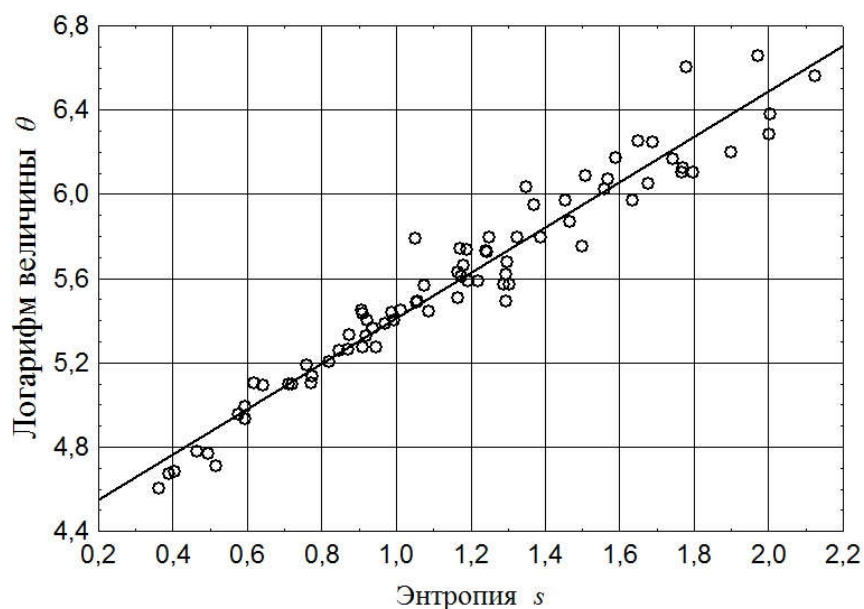


Рисунок 3.6 – Представление данных о состоянии регионов России для 2012 года, энтропия  $s$  определена в соответствии с (3.31)

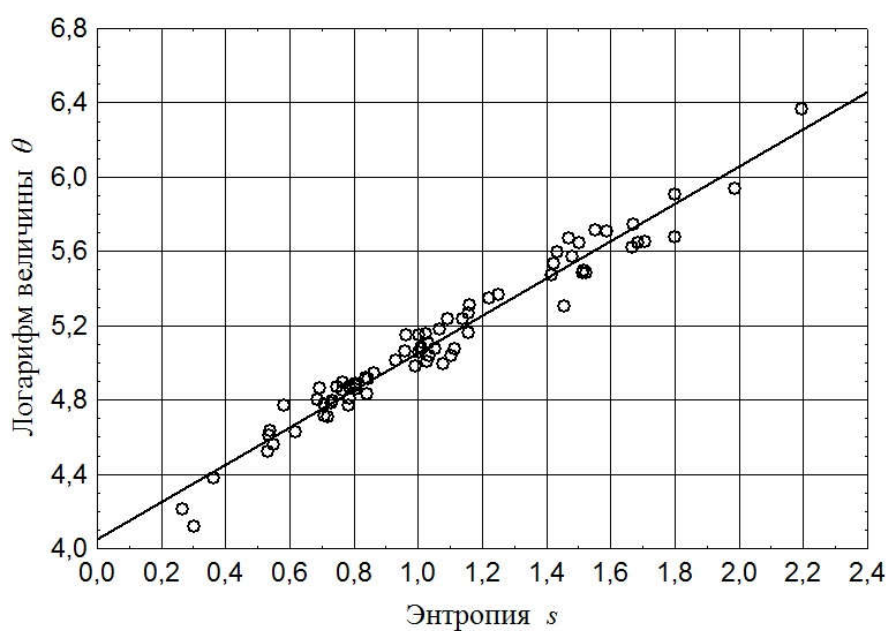


Рисунок 3.7 – Представление данных о состоянии регионов России для 2018 года, энтропия  $s$  определена в соответствии с (3.33)

При изучении развития регионов России было получено несколько десятков уравнений состояний с высокими коэффициентами множественной корреляции (0,95–0,99).

## 2.2. Вероятностный подход

В данном случае проведем оценку человеческого развития регионов России. В качестве переменных состояния для расчета используем следующие величины: валовый внутренний продукт (ВВП) на душу населения в пересчете по паритету покупательной способности в долларах США  $z_1$ ; ожидаемую продолжительность жизни  $z_2$ , лет; уровень грамотности населения  $z_3$ , %; долю охвата населения начальным, средним и высшим образованием  $z_4$ , %. Для решения задачи воспользуемся базами данных Докладов развития человека ПРООН для регионов России [189].

В качестве опорного состояния (точка  $M_0$ ) при построении уравнения состояния заданы минимальные значения перечисленных показателей, в частности, равные:  $z_1 = 2882$  \$;  $z_2 = 59,65$  лет;  $z_3 = 56,0$  %;  $z_4 = 46,7$  %. При анализе данных в качестве эмпирической меры принята относительная частота наблюдения состояний объектов в объеме фазового пространства  $w$ , в качестве менсуры – пробит вероятности  $Pr$ , определенный по относительной частоте  $w$ , в качестве среды моделирования – геометрическая вероятность положения точки в пространстве состояний, индикативное событие – совместное событие наблюдения значений параметров  $z_1 \div z_4$ . В результате анализа данных получено уравнение состояний в виде следующей регрессионной зависимости:

$$Pr = -5,766 + s; \quad w = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Pr} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt;$$

$$s = 0,618 \ln\left(\frac{z_1}{z_{1_0}}\right) + 8,968 \left(\frac{z_2}{z_{2_0}}\right) + 36,476 \ln\left(\frac{z_3}{z_{3_0}}\right) + 3,028 \left(\frac{z_4}{z_{4_0}}\right). \quad (3.34)$$

Коэффициент корреляции зависимости (3.34) составил 0,90, результаты обработки данных приведены на рисунке 3.8.

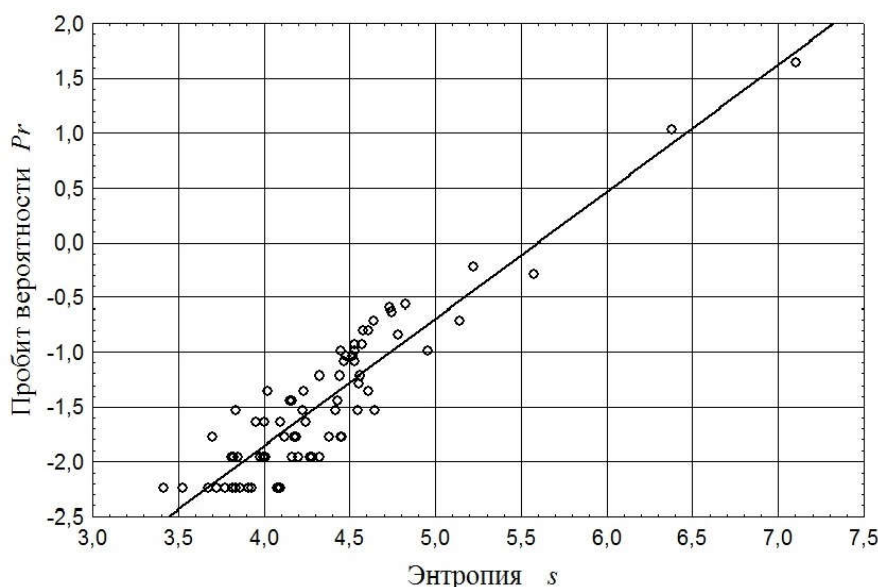


Рисунок 3.8 – Представление данных о состоянии регионов России по показателям человеческого развития, энтропия  $s$  определена в соответствии с (3.34)

Из рисунка видно, что города Москва и Санкт-Петербург (две верхние точки) выпадают из однородной группы регионов, что вполне естественно, поэтому их следует исключить.

### 2.3. Эмпирический подход

Создадим измерительную эмпирическую шкалу на основе переменных состояния, характеризующих сектор реальной экономики регионов России, которые перечислены выше в пункте 2.1 данного раздела. Будем использовать для построения линейной шкалы метод двух точек, для чего выберем опорный объект и несколько реперных состояний этого объекта. В качестве первого реперного состояния измерительной шкалы (опорная точка  $M_0$ ) примем состояние Белгородской области в 2005 году, в качестве второго реперного состояния (опорная точка  $M'_0$ ) – ее состояние в 2018 году. Другие реперные точки шкалы будут

определяться состояниями объекта для нескольких годов статистических наблюдений в период с 2005 по 2018 годы. Для данного региона, как показала проверка, условие линейности шкалы для промежуточных значений измеряемой величины (данные в диапазоне 2005÷2018 годов) выполняется с высокой точностью.

В данном случае при анализе данных за эмпирическую меру принято время наблюдения, на основе которого определялась менсура  $\theta$ , измеряемая в градусах этой величины, в качестве среды моделирования – функция меры относительных изменений. Измерительная шкала формировалась путем установления линейной зависимости между менсурой  $\theta$  и удельными показателями развития  $z_1 \div z_7$ . Значения величины  $\theta$  на интервале 2005–2018 гг. зависели линейно от времени: 2005 г. –  $0^\circ G$ , 2006 г. –  $10^\circ G$  и т.д. до 2018 г. –  $130^\circ G$ . Таким образом, шкала в интервале времени 2005–2015 гг. разбивалась на 100 равных делений. Изменение одного деления было принято за единицу измерения шкалы ( $1^\circ G$ ), каждому году соответствовало  $10^\circ G$ .

Обработка данных позволила установить функциональную зависимость для построения шкалы (рис. 3.9):

$$\begin{aligned} \theta = -27,754 + \Theta; \quad \Theta = 0,101z_1 + 0,128z_2 + 0,490z_3 - \\ - 0,254z_4 - 0,0212z_5 + 0,417z_6 + 0,470z_7. \end{aligned} \quad (3.35)$$

Максимальная погрешность шкалы не превышает  $0,57^\circ G$ , средняя –  $0,38^\circ G$ . Реперные точки для двух годов (2008, 2009) были исключены.

По аналогии с термометрией менсуру, получаемую путем прибавления константы  $a_0 = 27,754$  к значению величины  $\theta$ , назовем абсолютной менсурой и будем обозначать буквой  $\Theta$ .

Зависимость (3.35) была использована для измерения состояний регионов России в шкале абсолютной менсуры  $\Theta$ , которая выступала как мера сходства состояний и связана через константу  $a_0$  с менсурой  $\theta$  в виде

$\Theta = \theta + 27,754$ . При  $\theta_0 = -27,754$  получаем  $\Theta = 0$ , это состояние назовем абсолютным нулем, ему соответствуют значения переменных состояния  $z_k = 0$ . Использование величины  $\Theta$  для измерений определено ее положительными значениями в отличие от величины  $\theta$ .

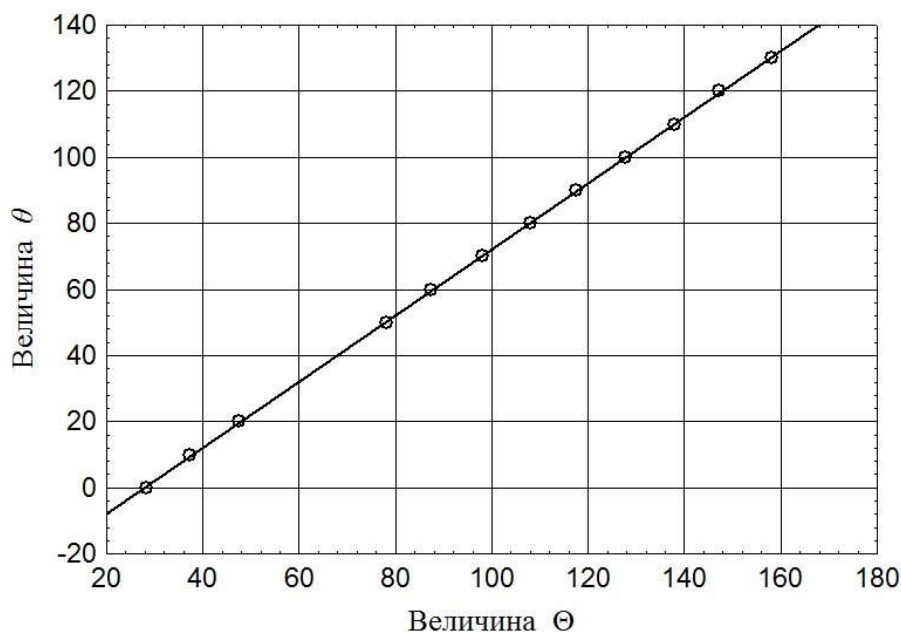


Рисунок 3.9 – Сравнение эмпирических шкал величин  $\theta$  и  $\Theta$  при оценке сходства состояний регионов России

Установим взаимосвязь между абсолютной менсурой и функцией меры относительных изменений вида (2.7). Обработка всех данных для 80 регионов России за 14 лет позволила получить следующее уравнение:

$$\ln T = -25,550 + 6,434 \ln \Theta. \quad (3.36)$$

Коэффициент корреляции зависимости (3.36) составил 0,91, результаты обработки данных приведены на рисунке 3.10.

Как видно из рисунка, зависимость от времени уравнения (3.36) в диапазоне 2005–2018 годов выражена слабо несмотря на то, что изменение переменных состояния с течением времени очень существенно. Это указывает на то, что путем введения корректирующих поправок для

каждого объекта могут быть получены с высокой точностью уравнения состояний. Использование подобных закономерностей дает возможность подойти к построению системно-феноменологической теории развития природно-технических или природно-антропогенных систем.

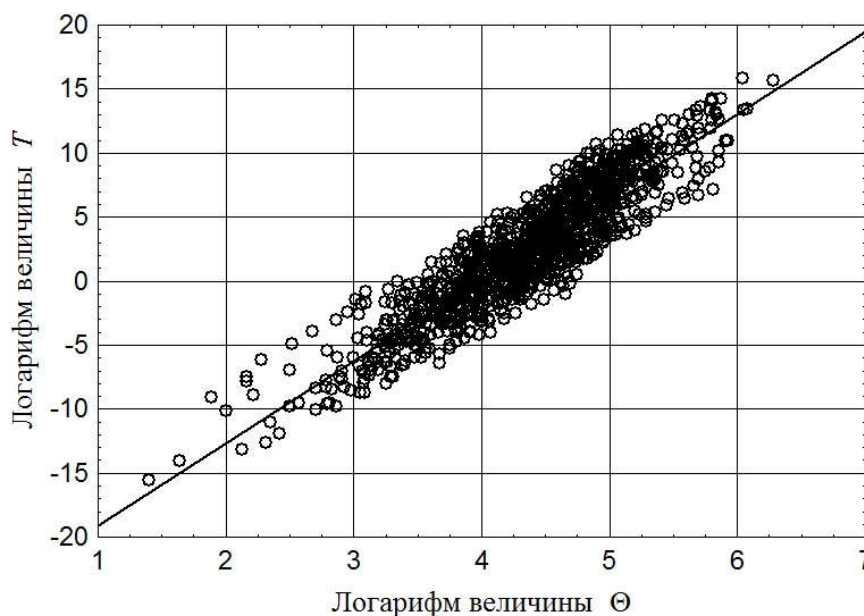


Рисунок 3.10 – Уравнение взаимосвязи величин  $T$  и  $\Theta$  для оценки сходства состояний регионов России, обработан весь класс объектов (1120 наблюдений), диапазон времени 2005–2018 гг.

### 3) Урбанизированные территории – Города России.

Для исследований сформируем базу данных социально-экономических показателей городов России [190], которая характеризует состояние экономики и социальной сферы городов с населением свыше 100 тыс. чел. (всего 154 города, без Москвы и Санкт-Петербурга). Для каждого города имеется информация по 63 основным социально-экономическим показателям в период времени с 2003 по 2017 годы (с шагом один год).

При обработке данных будем использовать геометрический и вероятностный подходы при оценке сходства состояний объектов и различные перечни переменных состояния.

### 3.1. Геометрический подход

Для примера выберем для анализа данных в качестве переменных состояния четыре удельных показателя, характеризующих развитие экономики городов:

- объем товаров собственного производства, выполненных работ и услуг собственными силами. Обработывающие производства  $z_1$ ;
- объем работ в строительстве  $z_2$ ;
- оборот розничной торговли  $z_3$ ;
- объем инвестиций в основной капитал  $z_4$ .

Размерность величин задана в тыс. руб./чел. Эталонный процесс выбран в виде развития города Белгорода в 2003–2015 гг. В качестве эмпирической меры сходства принято евклидовое расстояние, в качестве среды моделирования – функция меры относительных изменений. За опорные состояния (точки  $M_0$  и  $M'_0$ ) при построении измерительной шкалы выбраны состояния г. Белгород в 2003 и 2015 годах.

Например, результаты оценки экономического развития городов России в шкале  $\theta$  могут быть описаны уравнениями (рис. 3.11, 3.12):

- для 2005 года:  $\ln \theta = 4,128 + s$ ;

$$s = 0,406 \frac{z_1}{z_{1_0}} + 0,398 \frac{z_2}{z_{2_0}} + 0,181 \frac{z_4}{z_{4_0}}; \quad (3.37)$$

- для 2015 года:  $\ln \theta = 4,039 + s$ ;

$$s = 0,527 \frac{z_1}{z_{1_0}} + 0,340 \frac{z_4}{z_{4_0}}. \quad (3.38)$$

Качество полученных уравнений достаточно высокое, коэффициенты множественной корреляции составляют 0,93–0,97. При изучении состояния и развития городов России получено около 50 уравнений состояний высокого качества для различных наборов переменных состояния.

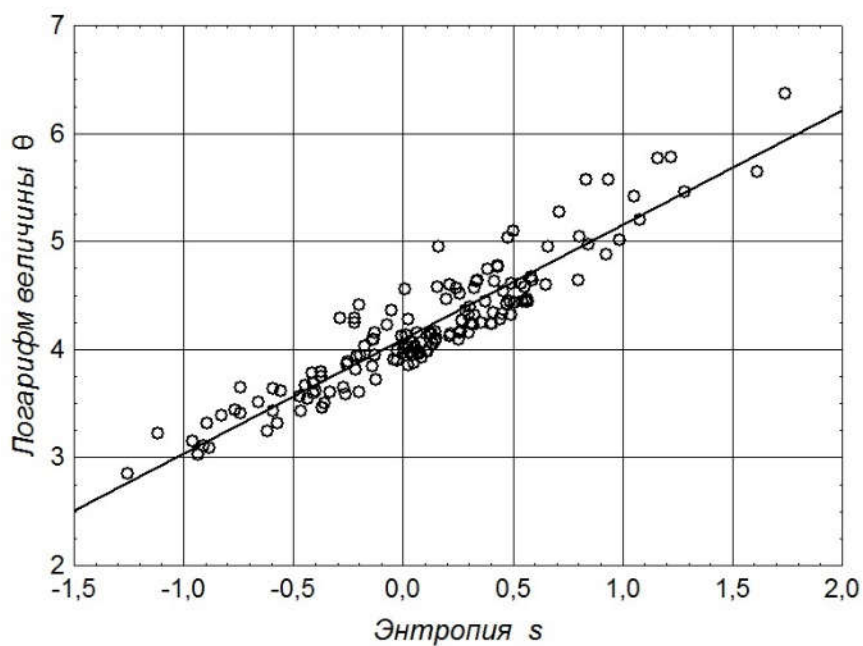


Рисунок 3.11 – Представление данных о состоянии городов России для 2005 года, энтропия  $s$  определена в соответствии с (3.37)

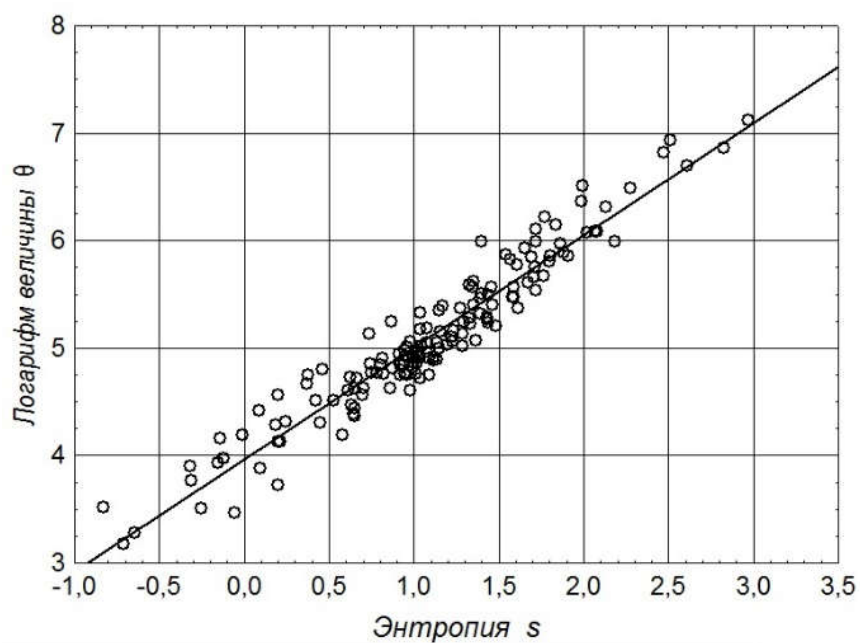


Рисунок 3.12 – Представление данных о состоянии городов России для 2015 года, энтропия  $s$  определена в соответствии с (3.38)

Полученные результаты позволяют провести ранжирование городов России по уровню и темпам развития, исходя из оценки потенциала состояний объектов.

### 3.2. Вероятностный подход

В данном случае для построения уравнений состояний объектов в виде эмпирических распределений в качестве переменных состояния используем следующие величины: численность работников организаций  $z_1$ , тыс. чел.; среднемесячную начисленную заработную плату  $z_2$ , руб.; инвестиции в основной капитал  $z_3$ , млн руб.

Данные переменные отражают состояние и развитие городов по факту ведения различных видов социально-экономической деятельности. Преимуществом вероятностного подхода является возможность использования переменных с различными единицами измерений, так как любое наблюдение рассматривается в виде события.

Регрессионные зависимости вероятности совместного события наблюдения двух ( $K = 2$ ) или трех ( $K = 3$ ) показателей (для выбранного года наблюдения) определялись в виде:

$$\text{Pr} = c_0 + s; \quad s = \sum_{k=1}^K c_k \ln \frac{z_k}{z_{k_0}}, \quad (3.39)$$

где  $c_k$  – константы,  $\text{Pr}$  – пробит вероятности, а  $z_k$  – переменные состояния. В качестве опорных величин использовались минимальные значения показателей  $z_{k_0} = z_{k \min}$  в группе городов (в столбце данных), которые наблюдались в 2003 году. В качестве среды моделирования принималась геометрическая вероятность положения точки в пространстве состояний, индикативное событие – совместное событие наблюдения значений параметров  $z_1 \div z_3$ . Шкала менсуры  $\theta$  определена пробит-функцией  $\text{Pr}$ . Некоторые из уравнений состояний для различных комбинаций переменных приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Уравнения состояния городов в виде статистических распределений

Год	Переменные состояния	Уравнение состояния	Коэф. коррел.
2003	$z_1, z_2, z_3$	$Pr = -2,849 + 0,579 \ln \frac{z_1}{z_{10}} + 0,944 \ln \frac{z_2}{z_{20}} + 0,092 \ln \frac{z_3}{z_{30}}$	0,94
2013	$z_1, z_2, z_3$	$Pr = -4,760 + 0,486 \ln \frac{z_1}{z_{10}} + 0,871 \ln \frac{z_2}{z_{20}} + 0,226 \ln \frac{z_3}{z_{30}}$	0,97
2015	$z_1, z_2, z_3$	$Pr = -4,763 + 0,520 \ln \frac{z_1}{z_{10}} + 0,923 \ln \frac{z_2}{z_{20}} + 0,169 \ln \frac{z_3}{z_{30}}$	0,96
2003	$z_1, z_2$	$Pr = -2,724 + 0,658 \ln \frac{z_1}{z_{10}} + 1,081 \ln \frac{z_2}{z_{20}}$	0,93
2013	$z_1, z_2$	$Pr = -4,614 + 0,706 \ln \frac{z_1}{z_{10}} + 1,168 \ln \frac{z_2}{z_{20}}$	0,96
2015	$z_1, z_2$	$Pr = -4,700 + 0,696 \ln \frac{z_1}{z_{10}} + 1,160 \ln \frac{z_2}{z_{20}}$	0,96
2003	$z_1, z_3$	$Pr = -2,499 + 0,788 \ln \frac{z_1}{z_{10}} + 0,273 \ln \frac{z_3}{z_{30}}$	0,99
2013	$z_1, z_3$	$Pr = -3,089 + 0,738 \ln \frac{z_1}{z_{10}} + 0,353 \ln \frac{z_3}{z_{30}}$	0,99
2015	$z_1, z_3$	$Pr = -3,025 + 0,711 \ln \frac{z_1}{z_{10}} + 0,350 \ln \frac{z_3}{z_{30}}$	0,99
2003	$z_2, z_3$	$Pr = -2,870 + 1,262 \ln \frac{z_2}{z_{20}} + 0,413 \ln \frac{z_3}{z_{30}}$	0,97
2013	$z_2, z_3$	$Pr = -5,891 + 1,226 \ln \frac{z_2}{z_{20}} + 0,470 \ln \frac{z_3}{z_{30}}$	0,98
2015	$z_2, z_3$	$Pr = -5,919 + 1,243 \ln \frac{z_2}{z_{20}} + 0,437 \ln \frac{z_3}{z_{30}}$	0,98

Как видно из таблицы, коэффициенты корреляции достаточно высоки (от 0,93 до 0,99). При этом наблюдается определенная зависимость коэффициентов распределений вида (3.39) от времени, что естественно для данного класса объектов, отличающихся выраженной динамикой процессов.

Вероятностный подход позволяет искать закономерности между вероятностями наблюдения различных событий. При изучении состояния и развития городов получено около 150 уравнений состояний для различных наборов переменных состояния и разных моментов времени.

#### *4) Природно-технические объекты – Земные территории.*

Рассмотрим процессы землепользования в странах мира в соответствии с данными [191]. Создадим эмпирическую шкалу менсуры на основе переменных состояния, характеризующих данные процессы:

- площадь природных земель  $z_1$ , км<sup>2</sup>;
- площадь мозаичных (управляемых) земель  $z_2$ , км<sup>2</sup>;
- площадь обрабатываемых земель  $z_3$ , км<sup>2</sup>;
- площадь маргинальных земель  $z_4$ , км<sup>2</sup>.

Выберем опорный объект и несколько реперных состояний этого объекта. В качестве первого реперного состояния эмпирической шкалы (опорная точка  $M_0$ ) примем состояние Австрии в 1995 году, в качестве второго (опорная точка  $M'_0$ ) – ее состояние в 2015 году. Другие реперные точки шкалы будут определяться состояниями объекта для различных годов статистических наблюдений в период с 1995 по 2015 годы.

В данном случае при анализе данных за эмпирическую меру принято время наблюдения, на основе которого определялась менсура  $\theta$ , измеряемая в градусах этой величины, в качестве среды моделирования – функция меры относительных изменений. Измерительная шкала формировалась путем установления линейной зависимости между менсурой  $\theta$  и переменными  $z_1 \div z_4$ . Значения величины  $\theta$  на интервале времени 1995–2015 гг. зависели линейно от времени: 1995 г. –  $0^\circ G$ , 2000 г. –  $25^\circ G$  и т.д. до 2015 г. –  $100^\circ G$ . Таким образом, шкала в интервале времени 1995–2015 гг.

разбивалась на 100 равных делений. Изменение одного деления принято за единицу измерения шкалы ( $1^\circ \Gamma$ ), каждому году соответствовало  $5^\circ \Gamma$ .

Обработка данных позволила установить функциональную зависимость для построения шкалы:

$$\theta = -7680,52 + \Theta; \quad \Theta = 0,090 z_1 - 0,002 z_2 + 0,080 z_3 + 0,470 z_4. \quad (3.40)$$

Также как и ранее, менсору, получаемую путем прибавления константы  $a_0 = 7680,52$  к значению величины  $\theta$ , назовем абсолютной менсурой и обозначим буквой  $\Theta$ . Зависимость (3.40) использована для измерения состояний стран мира по принятым показателям землепользования в шкале абсолютной менсуры  $\Theta$ , которая является положительной величиной.

Установим взаимосвязь между абсолютной менсурой и функцией меры относительных изменений вида (2.7). Обработка всех данных для 250 стран мира за 20 лет позволила получить следующее уравнение:

$$\ln T = -35,391 + 3,944 \ln \Theta. \quad (3.41)$$

Коэффициент корреляции зависимости (3.41) составил 0,99, результаты обработки данных приведены на рисунке 3.13. Как видно из рисунка, зависимость от времени уравнения (3.41) в диапазоне 1995–2015 годов выражена крайне слабо, поэтому для каждой страны могут быть получены соответствующие уравнения состояний высокой точности.

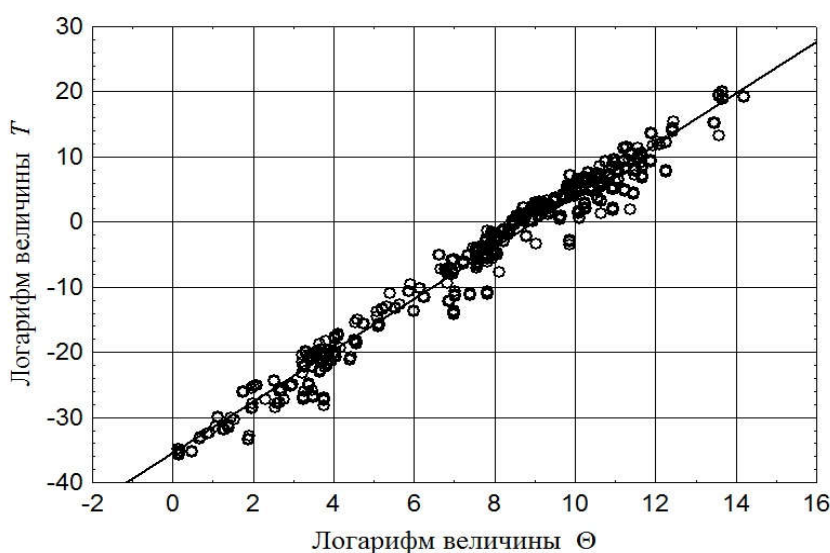


Рисунок 3.13 – Взаимосвязь величин  $T$  и  $\Theta$  для оценки сходства состояний стран мира по показателям землепользования, обработан весь класс объектов, диапазон времени 1995–2015 гг.

*5) Природно-технические объекты – Городские подсистемы жилищно-коммунального хозяйства.*

Улучшение качества жилищного фонда и жилищно-коммунальных услуг, повышение комфорта городской среды является одной из приоритетных задач социально-экономической политики государства. В России годовой оборот в сфере жилищно-коммунального хозяйства превышает 4,1 трлн. рублей, что составляет более 5,7 % валового внутреннего продукта (ВВП) страны [192]. Информация о состоянии жилищно-коммунального хозяйства содержала данные для 113 городов Российской Федерации [193, 194]. Информация охватывала значения показателей ЖКХ за период с 2006 по 2020 годы (всего 12 показателей): число источников теплоснабжения, протяженности тепловых, водопроводных, газовых и канализационных сетей, длины трубопроводов сетей, требующих замены, общая площадь жилых помещений и площадь ветхого жилья, площадь городских территорий и т.д.

В качестве показателей для анализа развития ЖКХ были приняты:

- относительная протяженность тепловых сетей  $z_1$ ;
- относительная протяженность водопроводных сетей  $z_2$ ;
- относительная протяженность канализационных сетей  $z_3$ .

Данные показатели определяли в безразмерном виде путем отношения общей протяженности каждой сети, выраженной в километрах, к величине  $\sqrt{S}$ , где  $S$  – площадь города, км<sup>2</sup>.

На основе переменных  $z_1, z_2, z_3$  формировалось трехмерное пространство состояний объектов [47]. С целью проведения анализа в качестве основной оценки состояний объектов использовалось совместное событие наблюдения значений показателей  $z_1, z_2, z_3$ , для которого алгоритмически определялась статистическая вероятность событий  $w$ . В

результате анализа связи величины  $Pr$  (3.39) со значениями переменных  $z_1, z_2, z_3$  была получена зависимость вида:

$$Pr = -4,871 + s; \quad s = 0,638 \ln z_1 + 0,375 \ln z_2 + 0,425 \ln z_3. \quad (3.42)$$

Коэффициент множественной корреляции зависимости (3.42) составил 0,93, результаты обработки данных приведены на рисунке 3.14.

Таким образом, в наблюдаемом пространстве состояний можно построить криволинейные координаты, которые позволят провести ранжирование городов России по показателям жилищно-коммунального хозяйства. Ранги городов определены на основе оценки потенциала состояния объектов в пространстве переменных  $z_1, z_2, z_3$  согласно [28] и приведены в таблице 3.2. Как видно из таблицы, наиболее развитые сети теплоснабжения и канализации существуют в городах Новосибирск, Екатеринбург, Нижний Новгород, Ростов-на-Дону, Челябинск, Оренбург, Астрахань, Краснодар.

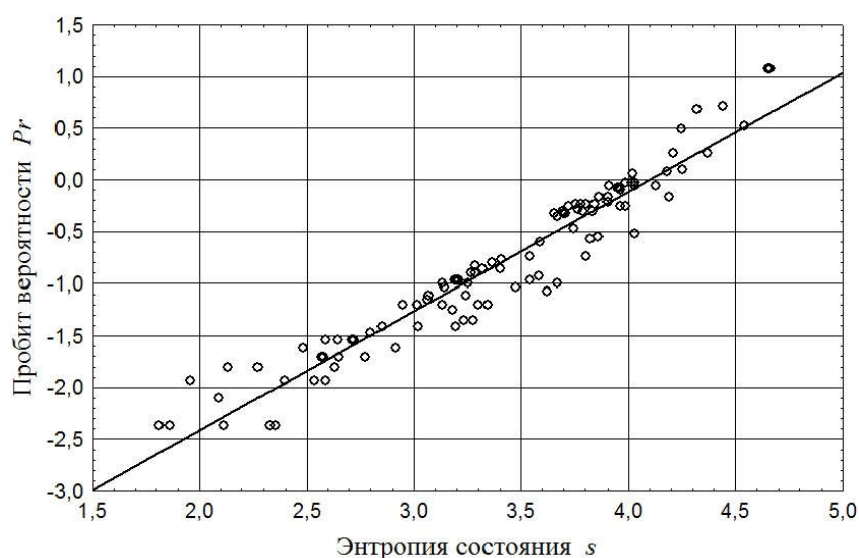


Рисунок 3.14 – Зависимость вероятности состояния системы от энтропии  $s$  для совместных событий наблюдения показателей ЖКХ в 2020 году

Таблица 3.2 – Значения энтропии состояния  $s$ , потенциала состояния  $P$  и ранги городов России по уровню развития ЖКХ

Города России	Энтропия $s$	Потенциал $P$	Ранги городов
Архангельск	3,3738	2325,2	70
Астрахань	4,2051	12886,3	7
Белгород	3,9959	11310,7	10
Благовещенск	2,7301	755,9	102
Брянск	4,0412	7644,9	22
Владивосток	3,9188	4921,6	38
Владимир	4,0239	6435,5	28
Волгоград	3,7949	4253,0	48
Воронеж	3,6690	3647,3	54
Екатеринбург	4,3854	17844,7	2
Иркутск	3,8783	4491,3	45
Казань	3,9692	6735,9	25
Калининград	4,1400	7313,5	23
Калуга	3,9950	6597,4	26
Кемерово	3,5546	3397,9	58
Кисловодск	3,4831	3249,7	60
Краснодар	4,4555	12188,3	8
Красноярск	4,2632	8704,8	15
Курск	3,4119	3717,2	53
Мурманск	3,2046	1733,4	83
Нефтекамск	1,8168	1054,4	96
Нижний Новгород	4,6757	17730,9	3
Новосибирск	4,6677	18000,6	1
Омск	4,2234	10967,2	12
Орел	2,6404	1834,5	80
Пермь	4,0327	6480,9	27
Псков	3,8561	4761,2	39
Ростов-на-Дону	4,5576	17529,9	4
Самара	4,3361	10428,2	13
Саратов	4,0378	7793,4	19
Северодвинск	2,3370	1168,4	94
Сургут	1,8665	1458,5	88
Тверь	3,7199	4570,2	43
Тольятти	3,7701	4401,2	46
Томск	3,8370	5085,2	37
Тюмень	3,2155	2019,2	74
Уфа	3,6844	8084,9	18
Хабаровск	3,7075	4369,6	47
Челябинск	4,3807	17321,9	5
Южно-Сахалинск	3,2206	1976,9	76
Якутск	3,3139	8260,4	17

Таким образом, на основе предложенного метода измерения состояний городских подсистем как природно-технических объектов возможна оценка их уровней развития по показателям ЖКХ или другим показателям, характеризующим ту или иную городскую технологическую подсистему.

Из всего приведенного выше материала видно, что для самых разных классов объектов могут быть найдены уравнения состояний в виде феноменологических соотношений.

Аналогичные результаты получены при обработке и анализе данных по природоохранной деятельности и анализу поведения социальных групп, оценке уровня заболеваемости в странах мира по данным ВОЗ, изучении исторических фактов и событий в техносфере, анализе устойчивого развития урбанизированных территорий [28, 42, 47, 49, 58, 78, 127–131] и т.д.

Полученные в данной главе результаты позволяют судить о перспективах применения предложенных методов интегрированной оценки на основе эмпирических и статистических данных в процессе изучения различных объектов. Разработанные методы дают возможность проводить исследование процессов развития сложных систем, которые в совокупности характеризуются разноплановыми показателями, в том числе имеющими различные размерности, например, экономическими, экологическими, социальными и техническими данными. Методология такого исследования основана на естественнонаучных методах и объективном подходе при построении моделей.

## Глава четвёртая

### **ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ**

Для обеспечения комплексного контроля параметров, характеризующих состояние водных объектов наблюдаемых территорий и объектов, был разработан программно-аппаратный комплекс, позволяющий организовать мониторинг как в режиме мобильного поста наблюдения, так и в автоматическом.

В состав мобильного поста наблюдения входит набор первичных измерительных преобразователей и система сбора, хранения, обработки и отображения информации на базе персонального компьютера.

Автономный комплекс экологического мониторинга включает в себя набор первичных измерительных преобразователей и автономную станцию сбора информации от первичных измерительных преобразователей, первичной обработки полученной информации и передачи ее на диспетчерский пункт.

Оперативный контроль физико-химических параметров производится измерителями температуры, pH, электропроводности, мутности проб воды, концентрации растворенного кислорода и т.д.

#### **4.1 Флуориметрическая система, основанная на принципах метода Pulse amplitude modulation (PAM)**

Ключевым элементом комплекса является разработанный в СКТБ «Турбулентность» ДонГУ флуориметр, предназначенный для измерения флуоресценции фитопланктона, находящегося в пробе воды. Измерение

флуоресценции – это эффективный комплексный метод количественной оценки и анализа состояния фитопланктона *in situ*. Флуоресценция фитопланктона может меняться в зависимости от состояния фотосинтетического аппарата, что особенно заметно при освещении предварительно адаптированного к темноте образца. Интенсивность флуоресценции сначала резко возрастает, затем постепенно снижается. Зависимость интенсивности флуоресценции от времени после начала освещения известна как индукционная кривая или кривая индукции флуоресценции. Анализ кривой индукции флуоресценции позволяет лучше понять взаимосвязь между структурой и функцией фотосинтетического аппарата и быстро оценить жизнеспособность растений и организмов [154].

#### **4.1.1 Структурная схема макета флуориметра**

Для проведения ЛР-теста простейшим методом является однолучевой метод регистрации флуоресценции. В этом методе один и тот же луч света возбуждает флуоресценцию и индуцирует процесс фотосинтеза, в ходе которого изменяется состояние фотосинтетического аппарата и квантовый выход флуоресценции [167].

Для реализации данного метода:

- интенсивность действующего света должна быть достаточной для поддержания фотосинтеза;
- измерительная система должна быть крайне селективной и иметь быстрый отклик;
- для снятия быстрой фазы индукции флуоресценции, необходима высокая частота дискретизации (порядка 100 кГц).

В любой системе измерения флуоресценции должно быть эффективное выделение излучения флуоресценции на фоне более сильного

света возбуждения. Обычно это достигается за счет использования соответствующих оптических фильтров, а также за счет построения оптической системы таким образом, чтобы направление излучения светодиодов к поверхности фотоприемника было под углом, близким к  $\pi/2$ . Для получения максимального выхода флуоресценции засветку образца необходимо производить равномерным излучением.

Макет флуориметра состоит из оптического блока и электронно-измерительного тракта (рис. 4.1). Оптический блок обеспечивает равномерное распределение засветки по всему образцу, а также эффективную регистрацию излучения флуоресценции фитопланктона. Электронно-измерительный тракт отвечает за поддержание постоянной интенсивности действующего света и управление детектированием отклика на это возбуждение, а также оцифровку детектированного сигнала, предварительную обработку и передачу полученных данных на ПК.

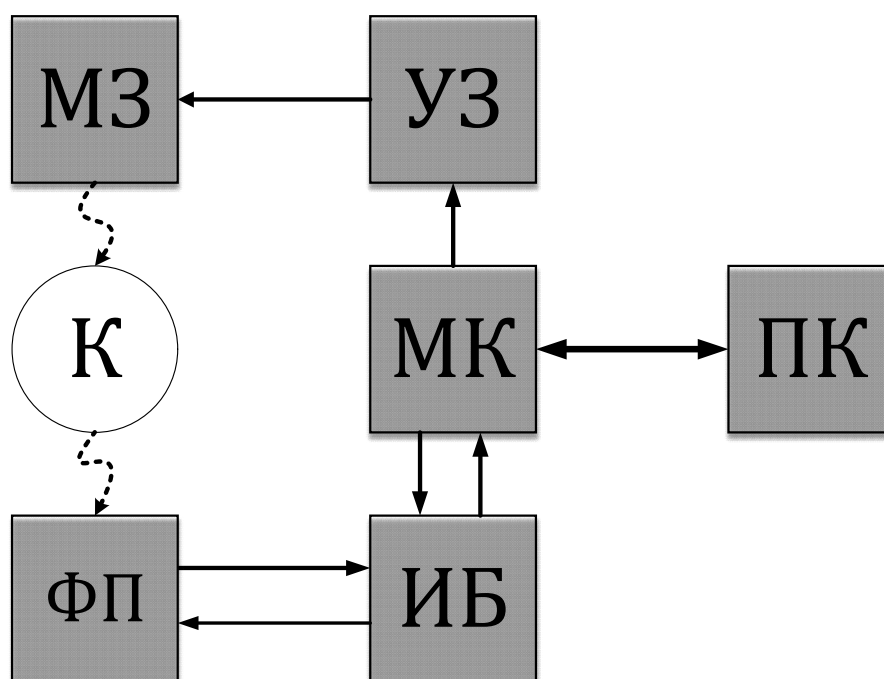


Рисунок 4.1 – Структурная схема макета флуориметра

В состав оптического блока входит:

- Модули засветки (МЗ). Представляют собой матрицы сверхмощных светодиодов. Обеспечивают однородную засветку пробы в кювете (К).
- Фотоприемник (ФП). Используется для регистрации флуоресценции фитопланктона.

В состав электронно-измерительного тракта входит:

- Микроконтроллерный блок (МК). Реализует алгоритм работы флуориметра управляя уровнем засветки и измерением выхода флуоресценции. Оцифровывает полученный сигнал и передает данные на ПК.
- Блок управления засветкой (УЗ). Обеспечивает поддержание заданного тока светодиодов для засветки пробы с постоянной интенсивностью света.
- Измерительный блок (ИБ). Представляет собой интегратор и устройство выборки-хранения.
- Блок питания (на структурной схеме не показан) обеспечивает стабильное питание всех модулей системы.

#### **4.1.2 Оптический блок макета флуориметра**

При измерении флуоресценции необходимо решать задачу выделения слабого сигнала флуоресценции на фоне света высокой интенсивности. Высокая избирательность в данном случае достигается как конструкцией оптического модуля, так и электронными методами. Таким образом, хорошая структура оптического модуля позволяет не только эффективно использовать источник света, но и повысить соотношение сигнал-шум.

Для достижения высокой избирательности необходимо минимизировать попадание фонового света в фотоприемник. Это достигается за счет геометрии оптических каналов и разделения спектров света возбуждения и эмиссии флуоресценции при помощи оптических фильтров.

Оптический блок флуориметра выполнен по «Т»-образной схеме (рис. 4.2) и содержит два оптических канала: возбуждения и приема флуоресценции. Каналы расположены ортогонально. Таким образом в фотоприемник попадает лишь малая часть света возбуждения, вызванная рассеянием и отражением от стенок корпуса. Данная схема позволяет получить высокую избирательность, следовательно, и возможность работы с малыми концентрациями фитопланктона.

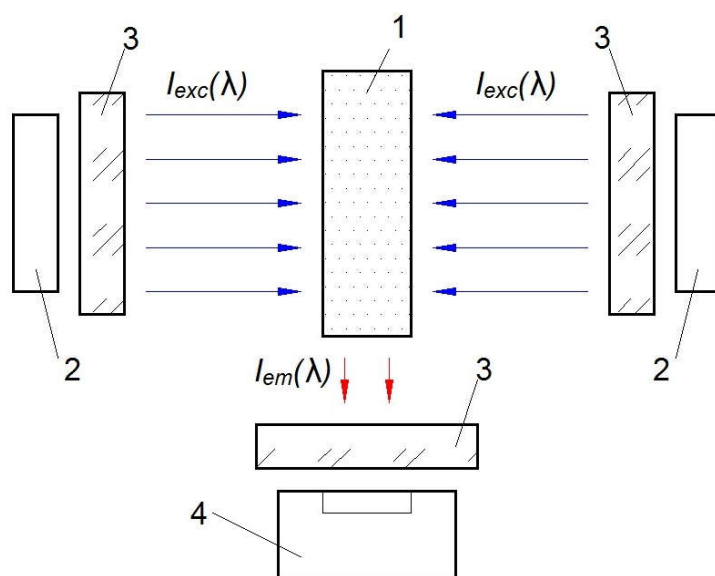


Рисунок 4.2 – Оптическая схема флуориметра: 1 – кювета с пробой, 2 – модули засветки, 3 – оптические фильтры, 4 – фотоприемник

Поскольку максимумы спектров поглощения оптического излучения и флуоресценции не совпадают, то в оптической схеме необходимо применение дополнительной меры для повышения эффективности

возбуждения флуоресценции и измерения ее интенсивности. Для этого в макете были использованы дихроичные светофильтры (3 на рис. 4.2). Возле модулей засветки находятся фильтры с рабочей длиной волны, коррелирующей с локальным максимумом поглощения фитопланктона. Соответственно фильтр возле фотоприемника пропускает свет в красной части спектра, где находится максимум излучения флуоресценции. Это обеспечивает существенное уменьшения влияния постороннего светового шума, увеличивает селективность оптической схемы и дополнительно усиливает оптическую развязку между источником излучения и фотоприемником. На рисунке 4.3 представлен макет описанной оптической схемы.

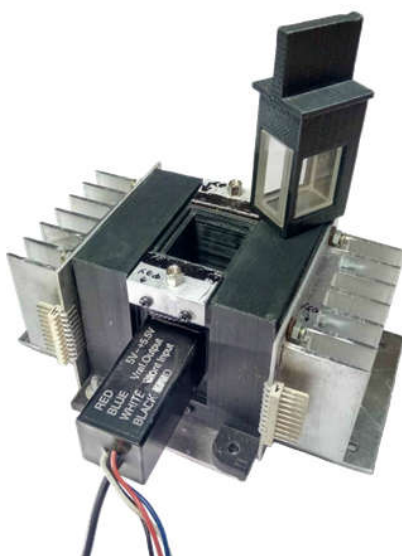


Рисунок 4.3 – Макетный образец оптической схемы флуориметра

В качестве фотоприемника флуоресценции в флуориметре применен малогабаритный фотоэлектронный умножитель H10721-01 фирмы Hamamatsu (Япония). Данный прибор представляет собой современный ФЭУ с компактной диодной системой, интегрированный с высоковольтным питанием и делителем в единый модуль.

В качестве источников света для модулей засветки выбраны светоизлучающие диоды (СИД). Они обладают следующими преимуществами: узкий спектр излучения, высокое быстродействие, малые габариты, высокая энергоэффективность, низкая стоимость, простое управление. Модули засветки должны обеспечивать максимально равномерную засветку кюветы флуориметра, обладать малыми габаритами и обеспечивать заданную интенсивность действующего света до  $2400 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . С учетом предложенной методики [195] были разработаны модули засветки флуориметра.

Модули засветки представляют собой матрицы сверхмощных светодиодов, по 12 светодиодов в каждой. В модуль были выбраны сверхмощные белые (3500 К) светодиоды CREE XP-E. Данные светодиоды обладают достаточной мощностью для обеспечения необходимой освещенности пробы и широким углом излучения.

Фитопланктон в кювете распределен по объему. Так как освещенность убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от модуля засветки, то освещенность водорослей в кювете будет неравномерна. Для обеспечения равномерности распределения освещенности в кювете, в «плоскости видимости» фотоэлектронного умножителя модули засветки сделаны симметричными.

Разработанный флуориметр с использованием метода Pulse-Amplitude Modulation (PAM) измерения флуоресценции позволяет: измерять основные статические параметры процесса фотосинтеза фитопланктона, дифференцировать различные группы фитопланктона по таксономической принадлежности, проводить анализ процессов фотохимического и нефотохимического тушения флуоресценции методом насыщающей вспышки, снимать кривые индукции флуоресценции фитопланктона, а также проводить JIP-тест.

## 4.2 Флуориметрическая система, основанная на принципах метода Fast repetition rate (FRR)

Для проведения флуориметрических исследований в автономном режиме согласно ранее проведенному анализу [196] наиболее подходящим является протокол измерения флуоресценции FRR – Fast Repetition Rate.

Использование данного протокола позволяет достичь таких преимуществ [152]:

- регистрация сигнала флуоресценции в обедненных пробах воды с очень низкой концентрацией хлорофилла;
- возможность получить больше информации о функционировании фотосистемы II клеток фитопланктона;
- короткая длительность измерения, что особенно важно при исследовании русел и устьев рек;
- высокая энергоэффективность устройства.

Метод FRR позволяет реализовать протокол возбуждения в режимах ST и MT и протокол релаксации, а также допускает возможность свободно их комбинировать для достижения наилучшего отклика [197]. Таким образом, FRR дает возможность оценить как общую эффективность протекания фотосинтетических процессов, так и исследовать функциональное состояние отдельных переносчиков электронов, локализованных в ФС II. Это обеспечивает высокую вариативность применения протокола FRR для решения конкретных экологических и биофизических задач.

Возбуждение флуоресценции фитопланктона в режиме ST согласно FRR протоколу осуществляется засветкой образца серией из 80–120 вспышек длительностью 0,125–1,0 мкс с интервалами 0,5–2 мкс. Интенсивность каждой вспышки составляет  $15 \cdot 10^3 - 50 \cdot 10^3$  мкмоль квант  $\text{м}^{-2} \text{с}^{-1}$ . Возбуждение флуоресценции фитопланктона в режиме MT согласно FRR протоколу осуществляется засветкой образца серией до 4000 вспышек длительностью 0,125–32,0 мкс с интервалами 20 мкс – 20 мс. Интенсивность каждой вспышки составляет  $15 \cdot 10^3 - 50 \cdot 10^3$  мкмоль квант  $\text{м}^{-2} \text{с}^{-1}$ .

#### 4.2.1 Структурная схема макета флуориметра

Для практической реализации данной задачи разработан макет FRR флуориметра. Его техническую составляющую можно условно разделить на два функциональных блока: оптический и электронный. Оптический блок содержит различные конструктивно соединённые в единую систему элементы излучения, преобразования, фильтрации и приёма оптического сигнала. Электронный блок представляет собой набор электронных инструментов, который осуществляет формирование управляющего сигнала возбуждения необходимой интенсивности, а также обработку получаемого с фотоприемника сигнала флуоресценции исследуемого образца. На рисунке 4.4 представлена структурная схема макета FRR флуориметра.

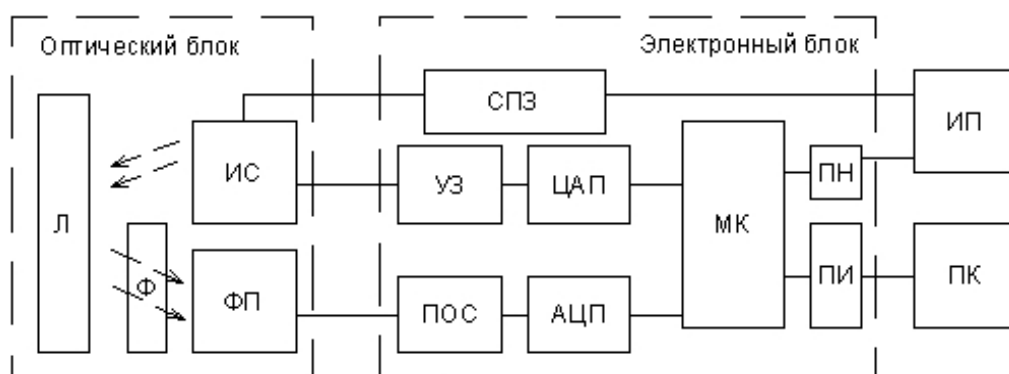


Рисунок 4.4 – Структурная схема макета FRR флуориметра

Оптический блок представляет собой источник света (ИС), который, согласно протоколу измерения флуоресценции, излучает короткие импульсы света длиной волны 450 нм [198]. Данные импульсы возбуждения с помощью плоско-выпуклой линзы (Л) фокусируются в области засветки, таким образом воздействуя на исследуемый образец. Полученный от водорослей отклик в виде сигнала флуоресценции проходит через оптический фильтр (Ф) и поступает на фотоприёмник

(ФП). Основой электронного блока является микроконтроллер (МК). С помощью цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) цифровой сигнал с микроконтроллера поступает в блок управления засветкой (УЗ), который непосредственно включает и выключает источник света. Для подачи стабильного питания высокой мощности на источник света необходим блок стабилизации питания засветки (СПЗ). Фотоприёмник представляет собой преобразователь оптического сигнала в электронный с токовым выходом. Полученный электронный сигнал методами фильтрации от помех и дальнейшего усиления, осуществляемого в блоке первичной обработки сигнала (ПОС), усиливается до необходимых логических уровней и поступает на аналогово-цифровой преобразователь (АЦП). Оцифрованный сигнал флуоресценции поступает в микроконтроллер для дальнейшей цифровой обработки и передачи оператору. Связь микроконтроллера с персональным компьютером (ПК) оператора осуществляется с помощью преобразователя интерфейсов (ПИ). Питание устройства осуществляется от внешнего независимого источника питания (ИП), а все уровни напряжений, необходимые для работы внутренних функциональных блоков флуориметра, формируются внутренним преобразователем напряжений (ПН).

#### **4.2.2 Конструктивная реализация макета флуориметра**

В результате проведенного анализа различных возможных вариантов конструкторского исполнения флуориметра [151] было выявлено, что наиболее оптимальным и доступным с точки зрения простоты герметизации и надёжности является изготовление флуориметра цилиндрической формы с использованием «окна» в торце корпуса. Данный тип корпуса допускает наличие только одной плоскости герметизации, а

цилиндрическая форма позволяет использовать для герметизации резиновое уплотнительное кольцо без дополнительных резьбовых соединений, что в свою очередь упрощает, как конструкцию, так и сборку корпуса. На рисунке 4.5 изображён разработанный опытный образец погружного флуориметра «ФП-3».



Рисунок 4.5 – Опытный образец погружного флуориметра «ФП-3»

Таким образом, для работы в составе комплекса биомониторинга поверхностных вод использование флуориметра, работающего по протоколу FRR, является перспективным. Протокол FRR позволяет проводить исследование параметров работы фотосинтетического аппарата фитопланктона *in situ*. Высокая интенсивность засветки позволяет работать с образцами воды, содержащими низкую концентрацию хлорофилла, что более характерно для природных водных объектов. Высокая скорость проведения измерений флуоресценции фитопланктона позволяет работать в условиях высокой скорости течения воды без применения различных систем отбора проб.

### 4.3 Электромагнитный измерительный преобразователь скорости электропроводящей жидкости

Для оценки качества природных вод и прогнозирования антропогенного воздействия на водные объекты необходим анализ водного режима. Скорость течения является одним из важных элементов водного режима рек и водоемов. Сведения о режиме скоростей течения представляют большой интерес для изучения многих процессов, происходящих в реках. Эти сведения необходимы, в частности, для оценки скорости движения по рекам загрязняющих веществ, особенно при их аварийных выбросах, для уточнения условий формирования объема загрязнения, при моделировании экосистемы в условиях антропогенной нагрузки. В связи с этим, наличие в комплексе биомониторинга измерителя скорости и направления течений, позволяет в большей мере оценить состояние исследуемой водной среды.

Для решения вышеперечисленных задач, а также для нахождения эпюр скоростей в открытых русловых потоках, каналах, других водоемах в СКТБ «Турбулентность» ДонГУ был разработан однокомпонентный электромагнитный измеритель скорости течения жидкости (рис. 4.5).



Рисунок 4.5 – Общий вид однокомпонентного ЭМИ

Для определения скорости течения в морских акваториях, орбитальных волновых скоростей в прибрежных зонах моря был разработан двухкомпонентный электромагнитный измеритель скорости течения жидкости [199].

Измерительный преобразователь выполнен в виде цилиндра и содержит магнитную систему из сердечника и двух последовательно, однонаправленно включенных обмоток возбуждения для создания симметричного магнитного поля, что позволяет получить конкретную и стабильную диаграмму направленности и, тем самым, однозначно определить ту или иную компоненту скорости потока (рис 4.6).



Рисунок 4.6 – Измерение скорости потока на выходе галерей водосбросового сооружения Третьего городского пруда

Новые принципы и конструктивные решения, заложенные в разработках электромагнитных измерителей, наличие прикладного программного обеспечения, полная автономность и дистанционная передача результатов измерений позволяет открыть перед данным типом измерителей еще более широкие перспективы применения. Разработанные алгоритмы обработки выходного сигнала преобразователя позволили

минимизировать влияние помех на погрешность измерения скорости потока жидкости электромагнитным измерителем и получить требуемые метрологические характеристики. Реализация таких измерителей в виде универсальных компактных автономных комплексов и устройств позволит расширить круг решаемых научных и практических задач.

#### **4.4 Автономная станция сбора и передачи информации**

Для организации мониторинга пространственно-распределенных объектов в автоматическом режиме была разработана автономная станция сбора информации от первичных измерительных преобразователей, первичной обработки полученной информации и передачи ее на диспетчерский пункт. На рисунке 4.7 представлена структурная схема автономной станции. Макет автономной станции мониторинга пространственно-распределенных объектов оснащён собственным источником питания – аккумуляторной батареей, которая обеспечивает время автономной работы до 6 месяцев.

Измерительный модуль состоит из набора подключаемых каналов, с помощью которых обеспечивается связь с внешними измерительными устройствами. Данный модуль позволяет подключать дискретные и аналоговые входы, а также различные датчики, работающие по интерфейсу RS-485. Передача данных в центральную систему обработки данных осуществляется по беспроводному каналу связи GSM/GPRS. При отсутствии покрытия сети в зоне проведения измерений, контроллер обработки информации сохраняет данные мониторинга на собственный электронный носитель с возможностью последующей передачи данных при восстановлении связи.



Рисунок 4.7 – Структурная схема автономной станции мониторинга пространственно-распределенных объектов

Структура автономной станции мониторинга пространственно-распределенных объектов разработана по модульному принципу. Это обеспечивает возможность расширения функционала, упрощает модернизацию и адаптацию станции под конкретный технологический процесс. Центральным блоком данной системы является модуль сбора информации. Модуль сбора информации реализует алгоритм работы всей станции, осуществляет сбор данных со всего комплекса подключаемых датчиков, управляет питанием системы и реализует протоколы обмена с интеллектуальной системой обработки данных. Модуль модема обеспечивает работу станции в сетях GSM/GPRS. Модуль питания предназначен для формирования необходимых напряжений питания подключаемых датчиков и модулей станции. Кросс-плата обеспечивает соединение всех модулей с необходимыми сигналами и питанием через стандартизированный интерфейс подключения модулей.

## **4.5 Алгоритм функционирования модуля сбора информации**

При разработке автономного комплекса контроля технологических параметров низкое энергопотребление было достигнуто как аппаратными, так и программными средствами, с учетом режимов работы комплекса.

Учитывая низкую динамику изменения параметров объектов мониторинга, был выбран режим работы с периодичным включением комплекса, в течение которого производится сбор данных датчиков и отправка диспетчеру через GPRS модем. В интервалы времени между включениями комплекс не должен потреблять энергию аккумуляторов или потреблять столько, чтобы этой величиной можно было пренебречь. Отношение времени активной работы комплекса ко времени между включениями более чем на порядок обеспечивает значительную экономию заряда аккумуляторной батареи. Разработанный комплекс может работать в режиме с непрерывным контролем за одним и более параметрами. Данный режим необходим для мониторинга динамичных процессов.

Низкое энергопотребление и низкое напряжение питания ядра выбранного процессора позволили спроектировать такую принципиальную схему, в которой контроллер непрерывно запитан, а питание датчикам и другим элементам принципиальной схемы подается на короткий промежуток времени для осуществления сбора и передачи информации диспетчеру. Постоянное питание контроллера также позволяет использовать встроенные часы реального времени без резервного элемента питания. На рисунке 4.8 изображен опытный образец разработанной автономной станции мониторинга пространственно-распределенных объектов. Данная автономная станция спроектирована согласно нормам пыле- и влагозащиты стандарта IP68 и прошла апробацию при эксплуатации в водной среде.



Рисунок 4.8 – Разработанный опытный образец автономной станции мониторинга пространственно-распределенных объектов

Наличие такого комплекса позволит организовать пространственно-распределенную сеть непрерывного мониторинга состояния водных объектов, организовать продолжительную автономную работу пунктов наблюдения за характеристиками состояния контролируемой среды, значительно развить и оптимизировать наблюдательную сеть при минимальных финансовых затратах, получать оперативную информацию из труднодоступных районов, значительно увеличивая достоверность прогнозов состояния контролируемых объектов.

## Глава пятая

### **ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ ПРОСТРАНСТВЕННО- РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ**

#### **5.1 Информационные технологии мониторинга режимов работы водораспределительной сети**

Принимая во внимание ограниченность водных ресурсов, вопрос энергосбережения, эффективного распределения воды, контроля ее качества и потребления становится важнейшей задачей в области стратегического развития государства. Задачи поддержания эффективных и оптимальных режимов работы объектов водораспределительной сети, позволяющих обеспечить экономию электроэнергии и воды, а также задачи распознавания внештатных режимов и аварийных ситуаций являются наиболее важными для предприятий водоснабжения. В настоящее время работой водопроводных узлов в большинстве случаев управляют ситуационно, принимая во внимание установленные режимы водоподачи, полученные с помощью гидравлических расчетов водопроводных сетей при проектировании. Использование этих методов при оперативном управлении затруднительно, что связано с необходимостью получения большого количества исходных данных, крайне высокой их неопределенностью и низкой достоверностью, чрезмерно большими затратами машинного времени на проведение расчетов даже при использовании мощных современных ЭВМ. Очевидно, что оптимизация работы мощного водонасосного и водораспределительного оборудования невозможна без создания современной информационно-аналитической системы мониторинга и

управления водоснабжением города. Все чаще для поддержания эффективных и оптимальных режимов работы водораспределительных систем применяются методы интеллектуального анализа данных, с использованием информации базы данных о напорах на насосных станциях и значениях давления в диктующих точках водопроводных сетей.

Известно, что внедрение систем управления насосными станциями с промышленными контроллерами на основе использования частотно-регулируемых приводов позволяет снизить энергопотребление станций водоснабжения на 30–40%, уменьшить потери воды на 5–15% и сократить (до 40%) расходы на эксплуатацию и ремонт оборудования. Существует также множество технических решений, основанных на применении информационно-управляющих систем и систем мониторинга в области водораспределения, водоотведения и оценки качества питьевой воды [200–205]. В крупных городах распространены современные автоматизированные системы мониторинга и управления водоснабжением. Такие системы направлены на сбор информации для дальнейшего использования, анализа и выполнения прогнозов. Автоматизированные системы мониторинга контролируют расходы воды на водопроводных узлах и подкачивающих станциях, уровни воды в резервуарах, давление в сетях, потребление электроэнергии, режимы использования насосного оборудования и запорной аппаратуры, параметры качества воды и т.д. Автоматическое управление осуществляется насосами, запорной аппаратурой, частотными преобразователями и т.д. Например, автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) крупных городов работают на основе современных систем связи и передачи информации, имеют развитые системы мониторинга и управления технологическими режимами [200–204]. Аппаратно-программные комплексы, поддерживающие работу таких систем, используют развитые информационные сети и значительные

вычислительные мощности, ориентируются на применение SCADA-систем, профессионально ориентированное программное обеспечение систем автоматизации и широкую номенклатуру аппаратных средств.

Развитие современных средств измерительной техники и систем сбора и передачи информации позволяет создавать пространственно-распределенные системы мониторинга технологических параметров работы водопроводных сетей [206, 207]. Результатом эксплуатации таких систем мониторинга является накопление предприятиями водоснабжения и водоотведения больших объемов технологической информации и необходимость при ее использовании применения методов интеллектуального анализа данных [208].

Так для решения задач оперативного управления подсистемами водоснабжения по факту поддержания эффективных режимов, а также задач распознавания внештатных режимов и аварийных ситуаций, необходимо иметь формализованное представление объектов автоматизации в виде гидравлических моделей или в виде статистических моделей. Разработка гидравлических моделей требует большого количества исходных данных, получение которых связано с немалыми затратами и организационными трудностями и, как следствие, имеющих достаточно высокую погрешность.

Более перспективным представляется применение методов прогнозирования временных рядов, регрессионных деревьев, эволюционного программирования, алгоритмов ограниченного перебора, многомерной визуализации и т.д.

Развитие этих методов является актуальной задачей в области совершенствования АСУ ТП, т.к. установление закономерностей в базах данных, содержащих информацию о режимах работы оборудования и водопроводных сетей, позволит разработать эффективные алгоритмы управления технологическими процессами [209].

Таким образом, объединение средств мониторинга с большими базами статистических данных и инструментами Data mining является перспективным путем развития информационно-аналитических и экспертных систем, обеспечивающих поддержку принятия решений на предприятиях водоснабжения и водоотведения.

Примером реализации такой системы является разработка и внедрение информационно-аналитической системы на предприятии «Вода Донбасса». На предварительных этапах проводилась работа по оснащению датчиками и измерительной аппаратурой технологических объектов предприятия водоснабжения, которая позволила реализовать следующий комплекс функций контроля режимов работы технологических систем водоснабжения:

- сбор и первичная обработка технологической информации, которая поступает от датчиков и первичных преобразователей;
- передача данных на диспетчерский пункт, накопление информации и контроль основных параметров технологических процессов;
- оперативный анализ собранной технологической информации, визуализация и регистрация данных о технологических процессах.

Внедрены следующие модули системы мониторинга водоснабжением города:

- система сбора и передачи информации с удаленных объектов;
- программный комплекс мониторинга технологической информации, включающий базы данных и геоинформационную систему (ГИС).

В процессе мониторинга контролируются расход воды и давление по напорным трубопроводам, уровни воды в приемных резервуарах, потребляемый насосными агрегатами ток, потребленная объектами электроэнергия и др.

В качестве источников информации были использованы следующие контрольно-измерительные приборы: электромагнитные расходомеры ИСП-204, ультразвуковые расходомеры Акрон-01, измерители давления ИД-01, ультразвуковые уровнемеры Акрон.

Программный комплекс мониторинга технологических режимов выполняет все функции, связанные с накоплением, хранением, анализом и представлением данных. Вся информация о технологических параметрах по радиоканалу или с помощью GSM-модемов передается на центральный диспетчерский пункт (ЦДП) – в базу данных системы мониторинга. Пользуясь запросами к серверной части и к базе данных, диспетчер ЦДП и диспетчеры районных служб водопроводно-канализационных систем (ВКС) могут контролировать в реальном времени обстановку на водопроводных и канализационных сетях, водопроводных узлах и канализационных насосных станциях города. Программный комплекс предоставляет пользователю удобный интерфейс для работы и отображает информацию в понятной и удобной форме [210–213].

## **5.2 Архитектура интеллектуальной системы мониторинга режимов работы водораспределительной сети**

Мониторинг и управление объектами осуществляются при помощи стандартных средств сетевого управления – SNMP, GPRS в следующих режимах:

- мониторинг событий, формируемых интеллектуальными сенсорами и их сетями, объектовым оборудованием и информационными системами и доставляемых на сервер системы в асинхронном режиме, где события обрабатываются в соответствии с их приоритетом и значимостью;

- проактивный мониторинг, формирующий прогнозы по рискам на основе всех доступных потоков данных и их аналитики, баз знаний с целью предотвращения вероятных критических событий.

Сбор информации от датчиков и управление технологическим оборудованием на объектах базируется на гибких технических вариантах построения системы, включая распределение датчиков и контроллеров в пределах технологической площадки, совместное использование продуктов различных производителей. Был использован открытый интерфейс по стандарту RS 232, RS 485 и низкоскоростная шина. Информация о технологических параметрах со всех контрольных точек, подкачивающих насосных станций и водопроводных узлов по каналам связи передается на центральный диспетчерский пункт. Средний уровень системы представлен локальными диспетчерскими на водопроводных узлах. Основная информация выводится на мнемосхемы для анализа (рис. 5.1).

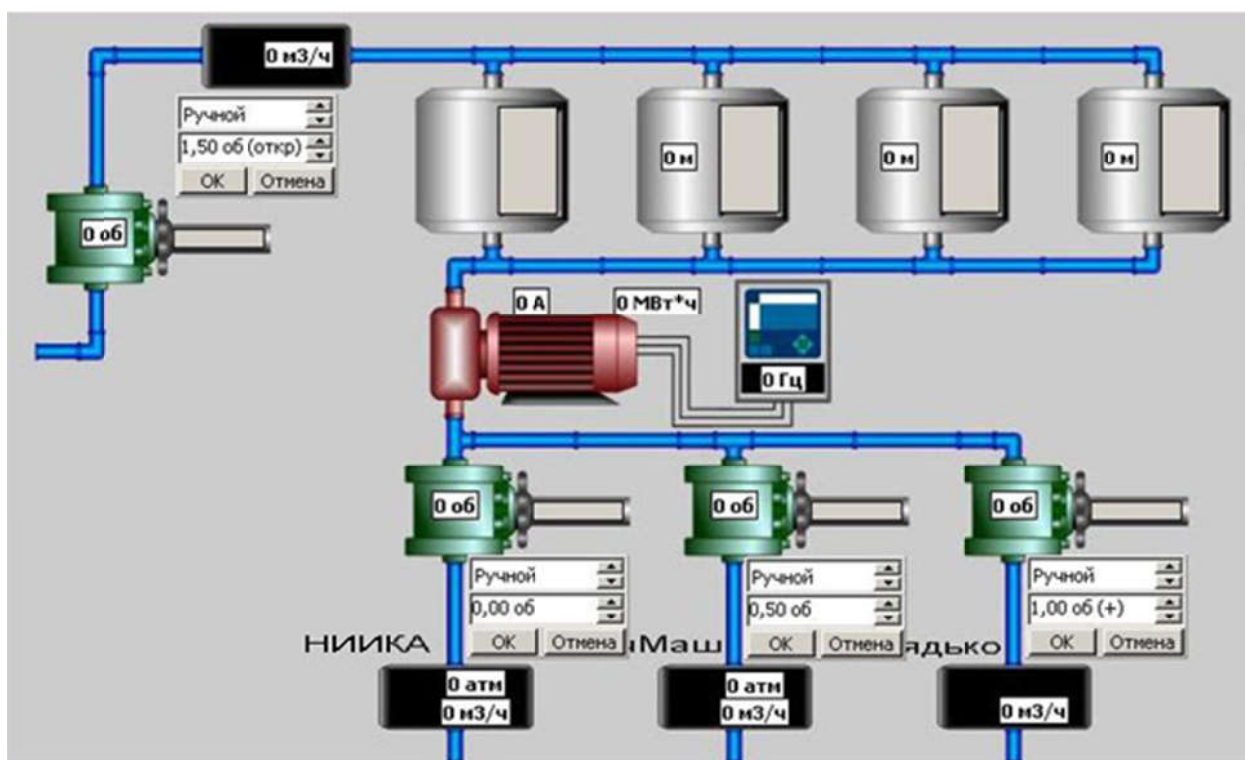


Рисунок 5.1 – Фрагмент мнемосхемы системы управления задвижками на сетях

В состав любой локальной диспетчерской входит промышленный компьютер, обеспечивающий поддержку работы машинистов оборудования.

Схема технического обеспечения АСУ ТП на водопроводных узлах и подкачивающих насосных станций дана на рисунке 5.2.



Рисунок 5.2 – Схема АСУ ТП на водопроводных узлах и ПНС системы водоснабжения города

Оборудование специализированных серверов и коммутаторов потоков данных, устанавливаемых на объектах предприятия, работает под управлением операционной системы с открытыми исходными кодами и обеспечивает возможность контроля:

- срабатывания дискретных датчиков, подключенных ко входам локальных серверов обработки данных и управляемых коммутаторов, подключаемых к асинхронным портам через внешние адаптеры типа RS-232/1-Wire;

- заданных пороговых значений на входах аналого-цифровых преобразователей (АЦП), контролируемых параметров на других специализированных датчиках;

- отсутствия ожидаемых событий о состоянии объектов мониторинга, формируемых по расписанию с заданным периодом опроса интеллектуальных датчиков состояния.

Работа пользователей ИАС поддерживается специализированными инструментальными средствами доступа к оборудованию ИАС, информационным ресурсам (базам данных мониторинга) и прикладным программам сбора, обработки, отображения и принятия решений по закрепленным за ними ролям, функциям, компетенциям и сферам ответственности.

В состав основного оборудования ИАС, устанавливаемой на объектах предприятия, в соответствии с решаемыми задачами и требуемым уровнем информационной безопасности включены:

- устройства сбора информации с первичных датчиков (сенсоров) состояния объектов мониторинга R642;

- локальная вычислительная сеть предприятия;

- локальные серверы сбора, хранения и обработки данных о состоянии заданной группы объектов мониторинга;

- контроллеры управления устройствами, контроля доступа на технологические объекты;

- средства коммутации потоков данных (управляемые и неуправляемые);

- сервер хранения данных, оборудованный устройствами хранения и доступа к базам данных информационных ресурсов службы безопасности (СБ) предприятия с достаточными емкостью памяти, производительностью, длительностью времени хранения архивов данных

(истории событий) и обработки запросов пользователей на поиск и представление данных для принятия решений, имеющий достаточный объем памяти для длительного хранения данных мониторинга СБ предприятия, и производительность, обеспечивающую требуемую скорость обработки запросов пользователей;

- рабочие места операторов системы, обеспечивающие работу в локальной компьютерной сети предприятия с заданным уровнем доступа к оборудованию ИАС и средствам коллективного (группового) отображения информации;

- удаленные рабочие места внешних зарегистрированных пользователей системы, оборудованные стационарными или мобильными ИТ устройствами, имеющими доступ в локальные и корпоративные сети и оснащенные приложениями для доступа к информационным ресурсам ИАС.

Ключевым компонентом, связывающим узлы сети передачи данных, является вид используемой связи, которая обеспечивает передачу трафика между узлами. Для организации передачи данных между узлами используются следующие виды каналов и способов связи:

- выделенные линии связи – медные кабели, соединяющие узлы сети заказчика;

- выделенные каналы данных – каналы данных, предоставляемые оператором связи поверх своей сети передачи данных, например, Ethernet VLAN; соединение на базе «группового» доступа, например, IP VPN, обмен данными по технологии VPLS (служба виртуальной частной локальной сети), с эмуляцией, распределенной локальной вычислительной сети поверх сети оператора;

В состав основных функциональных компонентов ИАС входят следующие системы и средства:

- локальные системы сбора данных о состоянии объектов, оперативной обработки информации и управления исполнительными

механизмами (датчики и преобразователи сигналов, коммутаторы и регистраторы, автономная система КРИД, контроллеры на водопроводных узлах и подкачивающих станциях, средства контроля доступа, охранной и пожарной сигнализации и оповещения и др.);

- средства идентификации пользователей, контроля доступа на технологические объекты;
- средства хранения информации (события, тексты, видеоизображения, голос и др.) о состоянии объектов;
- средства ведения геоинформационных баз данных общего и специального назначения;
- средства идентификации внутренних и внешних событий – инцидентов угроз безопасности и оценки рисков нарушения целостности объектов, процессов и ресурсов предприятия.

Основными задачами обработки потока данных являются:

- регистрация события и определение источника сообщения о событии;
- упорядочение потока событий и организация эффективного накопления потока событий (ведение архива истории событий);
- оперативная обработка поступающей информации в соответствии с заранее определенными правилами обработки и принятия решений;
- вторичная обработка массивов разнородных событий и корреляционных связей между ними (поиск взаимосвязанных событий, объектов и субъектов для принятия дополнительных мер, планирования мероприятий и других действий);
- принятие решений и формирование необходимых адресных сообщений для их исполнения [214, 215].

### **5.3 Автономный комплекс контроля технологических параметров**

Главной задачей при развитии контрольно-измерительной системы является создание сети первичных и вторичных измерительных приборов для контроля давления, расхода воды и электроэнергии. Такая сеть должна обеспечивать измерение количества энергии и воды, поступающей в систему, а также расчет количества воды, доставляемой потребителям. В наилучшем варианте контрольно-измерительная система должна охватывать всю водохозяйственную систему города вплоть до мест потребления воды и расходов энергии, однако при этом она должна быть оптимальной по стоимостным параметрам и эксплуатационным затратам [216–218].

На рисунке 5.3 представлен макет автономного комплекса контроля расхода и давления на водопроводных сетях. Данный комплекс предназначен для установки непосредственно на водоводы с целью непрерывного мониторинга расхода и давления воды. Макет автономного комплекса контроля технологических параметров снабжен собственным источником питания – аккумуляторной батареей, обеспечивающей время автономной работы до 6 месяцев. Передача данных в диспетчерский пункт осуществляется по каналу GSM/GPRS, в отсутствие сети производится запись архива данных мониторинга на собственный электронный носитель с последующей передачей данных в диспетчерский пункт при восстановлении связи.

Структура макета комплекса контроля технологических параметров разработана по модульному принципу. Данный подход обеспечивает возможность расширения функционала, упрощает модернизацию и адаптацию комплекса под конкретный технологический процесс.



Рисунок 5.3 – Внешний вид автономного комплекса контроля технологических параметров

Учитывая низкую динамику изменения параметров технологического процесса объекта мониторинга, был выбран режим работы с периодичным включением комплекса, в течение которого производится сбор данных датчиков и отправка диспетчеру через GPRS модем. В интервалы времени между включениями комплекс не должен потреблять энергию аккумуляторов или потреблять столько, чтобы этой величиной можно было пренебречь. Отношение времени активной работы комплекса ко времени между включениями более чем на порядок обеспечивает значительную экономию заряда аккумуляторной батареи. Разработанный комплекс может работать в режиме с непрерывным контролем за одним и более параметрами. Данный режим необходим для мониторинга динамичных процессов.

#### **5.4 Построение моделей режимов работы водораспределительных сетей с помощью методов машинного обучения**

Для достижения поставленной в работе цели и решения сформулированных задач была разработана методика проведения исследований и работы с данными мониторинга технологических систем, которая включает в себя комплекс аналитических и статистических методов, методов формализации объектов мониторинга и управления технологическими режимами систем водоснабжения, методов сбора, накопления и представления данных, а также средств интеллектуального анализа данных.

Автоматический сбор информации и разработанное программное обеспечение для накопления и представления данных позволили сформировать базы данных технологической информации, которые достаточно полно характеризуют работу объектов системы водоснабжения района.

На основе собранной информации проводилась формализация объектов мониторинга и управления технологическими режимами систем водоснабжения, для чего использовались методы статистической обработки данных и методы интеллектуального анализа данных. При установлении закономерностей в базе данных технологической информации использовались методы анализа временных рядов, алгоритмы перебора и сортировки данных, методы визуализации информации, а также статистические методы [219–222]. С этой целью применялось различное программное обеспечение для формирования, представления и интерпретации исходных данных.

Были разработаны методики моделирования режимов работы водопроводной сети и апробированы на отдельных участках, в частности в Калининском районе г. Донецка.

В рамках данного исследования источником информации являлись датчики давления, расположенные на насосных станциях, а также автономные системы измерения давления, расположенные в контрольных точках на водоводах сети. В рамках данной работы через  $x_i$  ( $i=1, \dots, 5$ ) обозначены показатели давления воды на насосных станциях, через  $y_j$  ( $j=1, 2, 3$ ) – на сетях (рис. 5.4).

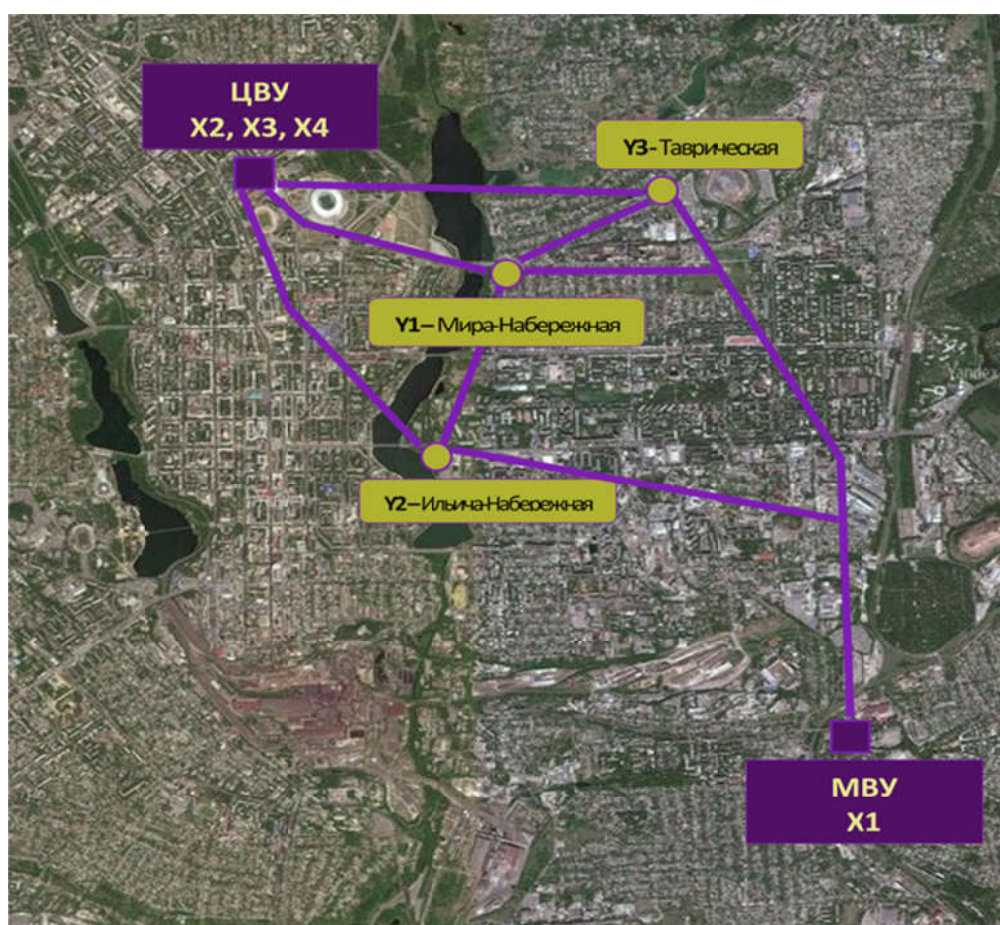


Рисунок 5.4 – Моделируемый участок водопроводной сети

Замеры производились автоматически каждые 30 минут с передачей на сервер центральной диспетчерской по GPRS-каналу.

Временное окно полученных данных: с 14.02.2012 по 30.07.2012.

#### 5.4.1 Особенности построения моделей режимов работы водораспределительных сетей с помощью гребневой и лассо-регрессий

При решении поставленной задачи выполнены следующие работы:

- проведен разведочный анализ данных для выявления выбросов и пропущенных значений, а также наличия связи между переменными;
- используя методы регуляризации для обеспечения надежности и эффективности оценок параметров регрессии в условиях мультиколлинеарности, построены модели множественной регрессии: гребневая и лассо-регрессия;
- построена модель регрессии на главные компоненты для отбора информативных факторов и комбинаций предикторов, позволяющая сократить количество предикторов и устранить их мультиколлинеарность;
- произведена оценка статистической значимости моделей на основе использования среднеквадратичной ошибки регрессии, коэффициента детерминации и дисперсионного отношения Фишера как критериев качества полученных моделей;
- осуществлен сравнительный анализ эффективности построенных моделей прогнозирования на основе оценки среднего квадрата ошибки прогноза на данных из тестовой выборки.

Данные были разбиты на обучающую и тестовую выборки (доля обучающей выборки – 0,8). После чего были построены регрессионные модели, в качестве переменной-отклика поочередно брались  $Y_j$  ( $j = 1, 2, 3$ ).

Для оценки степени мультиколлинеарности  $m$ -мерного комплекса переменных вычислен фактор инфляции дисперсии [223, 224].

В присутствии мультиколлинеарности дисперсия оценок параметров модели возрастает пропорционально величине [225]:  $VIF_j^o = 1/(1 - R_j^2)$ .  $VIF_j$  (*variance inflation factor*) – фактор инфляции дисперсии, чем он выше

для  $j$ -го предиктора, тем сильнее линейная связь между этим и остальными предикторами. В приведенной выше формуле  $R_j^2$  – коэффициент детерминации  $j$ -го предиктора относительно остальных.

Для выявления мультиколлинеарности по матрице наблюдений  $W$  и значениям переменной-отклика были построены  $m$  регрессионных моделей, из которых исключалось по одному предиктору, после чего для каждого  $j$ -го предиктора были вычислены коэффициенты детерминации и рассчитаны факторы инфляции дисперсии  $VIF_j$ , которые, в свою очередь, сравнивались с порогом, равным 2. Модели линейной регрессии имеют вид, описываемый формулами (5.1) – (5.3):

$$Y1 = 0,0121 \cdot X1 + 0,2088 \cdot X5 + 0,5922 \cdot Y2 + 0,0025 \cdot Y3 + 2,3582; \quad (5.1)$$

$$Y2 = -0,0323 \cdot X1 - 0,2437 \cdot X5 + 1,54068 \cdot Y1 + 0,0134 \cdot Y3 - 3,0755; \quad (5.2)$$

$$Y3 = 0,1631 \cdot X1 - 0,4601 \cdot X3 + 0,2656 \cdot Y2 + 2,7673. \quad (5.3)$$

На рисунке 5.5 приведены временные ряды предсказанных по моделям линейной регрессии значений  $Y1 - Y3$  и их реальных значений, взятых из тестовой выборки.

Из визуального анализа графиков можно сделать вывод о непригодности модели линейной регрессии (5.3) для  $Y3$ , а также об эффективности моделей (5.1) и (5.2).

Полученные показатели сведены в таблицы 5.1–5.3.

Гребневая регрессия (*ridge regression*) реализует классическую  $L_2$ -регуляризацию Тихонова, при которой оценки параметров модели  $\beta_i$  находят из условия минимизации среднего квадратического отклонения оценок параметров модели регрессии:

$$\hat{\beta} = \arg \min \left[ \sum_{i=1}^n \left( z_i - \sum_{j=1}^m \beta_j w_{ij} \right)^2 + \lambda \sum_{j=1}^m \beta_j^2 \right], \quad (5.4)$$

где  $z = \{y_i\}_{i=1}^n$  – имеющиеся наблюдения переменной-отклика;

$w^i = (w_1^i, \dots, w_m^i, \dots)$  – значения предикторов  $i$ -го объекта обучающей выборки,  $n$  – количество наблюдений,  $m$  – количество предикторов.

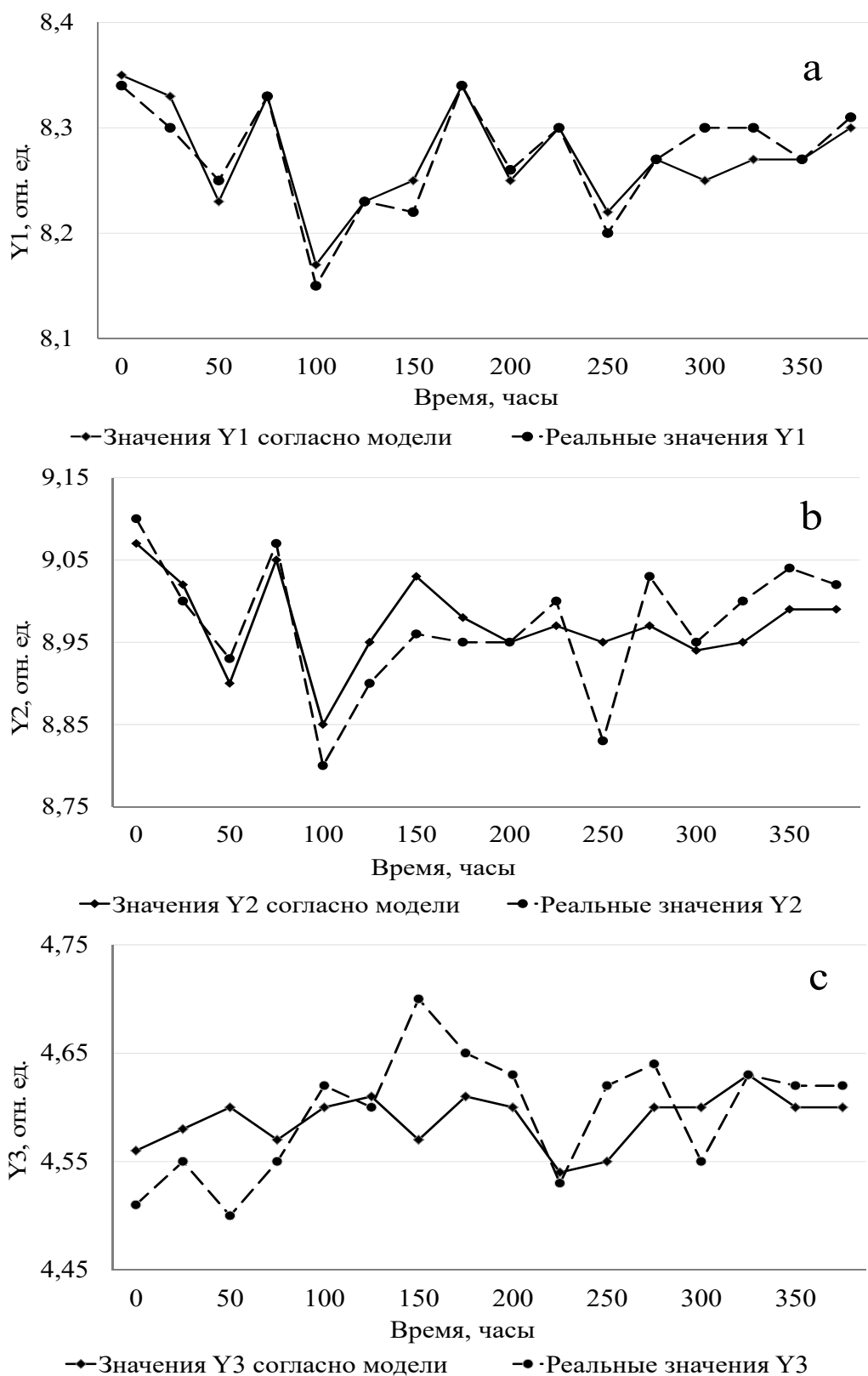


Рисунок 5.5 – Временные ряды предсказанных по модели линейной регрессии и реальных значений переменной Y1, Y2, Y3 (рисунки а, б и в, соответственно)

Таблица 5.1 – Значения VIF для моделей линейной регрессии для переменной-отклика Y1

X1	X2	X3	X4	X5	Y2	Y3
1,730	326,237	39,347	135,760	34,741	1,790	1,263
Исключаем X2						
1,394	–	25,221	40,414	13,340	1,631	1,216
Исключаем X4						
1,388	–	8,474	–	7,688	1,601	1,172
Исключаем X3						
1,358	–	–	–	1,893	1,481	1,074

Таблица 5.2 – Значения VIF для моделей линейной регрессии для переменной-отклика Y2

X1	X2	X3	X4	X5	Y1	Y3
1,713	337,235	39,316	140,718	37,661	2,421	1,247
Исключаем X2						
1,369	–	25,166	41,083	14,093	2,143	1,203
Исключаем X4						
1,374	–	8,109	–	7,940	2,062	1,158
Исключаем X3						
1,342	–	–	–	2,432	1,991	1,086

Модели гребневой регрессии имеют вид, описываемый формулами (5.5) – (5.7):

$$Y1 = 0,0269 \cdot X1 - 0,4954 \cdot X2 + 0,1120 \cdot X3 + 0,0606 \cdot X4 + 0,5387 \cdot X5 + 0,5869 \cdot Y2 - 0,0060 \cdot Y3 + 2,2955; \quad (5.5)$$

$$Y2 = -0,04274 \cdot X1 + 0,2951 \cdot X2 + 0,0236 \cdot X3 + 0,1000 \cdot X4 - 0,6722 \cdot X5 + 1,5410 \cdot Y1 + 0,0299 \cdot Y3 - 3,0177; \quad (5.6)$$

$$Y3 = 0,2000 \cdot X1 - 3,3500 \cdot X2 - 0,7257 \cdot X3 + 2,9944 \cdot X4 + \\ + 0,8501 \cdot X5 - 0,1613 \cdot Y1 + 0,3064 \cdot Y2 - 2,9716. \quad (5.7)$$

Таблица 5.3 – Значения VIF для моделей линейной регрессии для переменной-отклика Y3

X1	X2	X3	X4	X5	Y1	Y2
1,653	325,438	38,726	131,806	41,112	24,295	18,373
Исключаем X2						
1,365	–	22,922	40,573	17,519	23,842	18,367
Исключаем X4						
1,338	–	8,170	–	10,035	22,953	17,884
Исключаем Y1						
1,312	–	7,575	–	7,803	–	1,523
Исключаем X5						
1,284	–	1,860	–	–	–	1,517

На рисунке 5.6 приведены временные ряды предсказанных по моделям гребневой регрессии значений Y1 – Y3 и их реальных значений, взятых из тестовой выборки. Исходя из визуального анализа, можно сделать вывод о плохом качестве модели гребневой регрессии для предсказания Y3.

Лассо-регрессия (*LASSO*, от англ. *Least Absolute Shrinkage and Selection Operato*) реализует иной подход к определению параметров множественной регрессии, когда на основе матрицы парных коэффициентов корреляции строится уравнение регрессии в стандартизованном масштабе, т.е. в модели вместо исходных значений переменной отклика  $z$  и предикторов  $w_j$  берутся их стандартизированные значения  $z^0$ ,  $w_j^0$ , для которых среднее значение равно нулю, а среднее квадратическое отклонение равно единице.

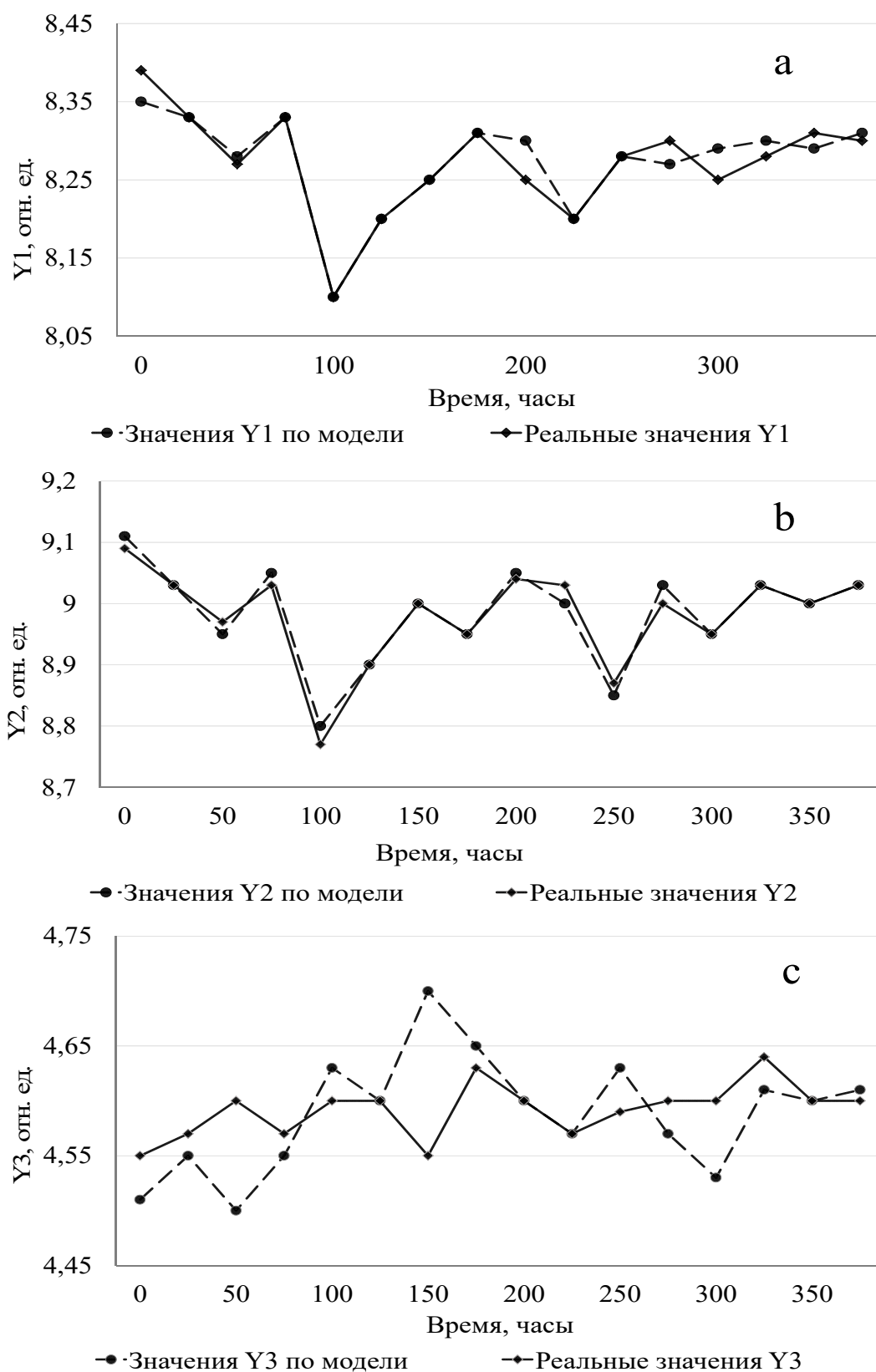


Рисунок 5.6 – Временные ряды предсказанных по модели гребневой регрессии значений и реальных значений для переменной Y1, Y2, Y3 (рисунки а, б и с соответственно)

Модели лассо-регрессии совпадают с моделями гребневой регрессии и имеют вид, описываемый формулами (5.5)–(5.7).

Для повышения результативности анализа многомерных данных большой эффект даёт снижение их размерности через выделение лидирующих факторов и комбинаций признаков. Анализ главных компонент (PCA, principal component analysis) является классическим методом снижения размерности данных, широко используемым в различных областях науки и техники и детально описанным в многочисленных руководствах [225, 226].

РСА выполняет симметричную обработку всей матрицы наблюдений. При этом алгоритм стремится построить небольшое количество ортогональных плоскостей, ориентируя их относительно максимума вариации точек отображаемых объектов, т.е. при проецировании на эти плоскости вносятся минимально возможные искажения в геометрию исходных данных. Ранжирование по дисперсии осей найденных латентных переменных позволяет выполнить поиск такой  $u$ -мерной системы координат ( $m > u$ ), которая содержит сжатое описание структурной зависимости исследуемой системы признаков  $X$  небольшим числом  $u$  факторов и без существенной потери информации. Результатом РСА-анализа конкретной матрицы наблюдений  $W$  размерностью  $(n \times m)$ , где  $n$  – число наблюдаемых объектов,  $m$  – число независимых переменных, является матрица  $T$  счетов (scores) размерностью  $n \times u$ , содержащая проекции исходных точек выборки  $W$  в новом  $u$ -мерном базисе.

Другая матрица  $P$  размерностью  $(u \times m)$  содержит нагрузки, обеспечивающие пересчет данных из  $m$ -мерного пространства исходных переменных в  $u$ -мерное пространство главных компонент. Каждая  $k$ -я строка матрицы  $P$  состоит из оценок коэффициентов  $p_{ik}$ , показывающих долю участия каждой  $i$ -й переменной из  $w_1, \dots, w_m$  в формировании  $k$ -й главной компоненты. Фактически это – проекция предиктора  $w_j$  на новую

$k$ -ю ось. Анализируя таблицу нагрузок, можно понять, какие исходные переменные связаны между собой, а какие независимы, и объяснить предметный смысл  $k$ -го предиктора.

Снижение размерности исходного пространства методом РСА можно представить как последовательный, итеративный процесс, который можно оборвать на любом шаге  $u$ . При этом важно знать, когда следует остановиться, т.е. определить «правильное» число главных компонент  $u$ . Обычно ориентируются на последовательность  $\lambda_1, \dots, \lambda_m$  собственных значений матрицы ковариаций предикторов и принимают решение, сколькими главными осями стоит ограничиться. Например, для интерпретации считается достаточным число осей  $u$ , объясняющих 75% дисперсии в исходных данных.

Результаты вычислений доли объясненной вариации данных показали, что первые главные компоненты объясняют 58–65%, а все три – более 92%. Можно сделать вывод, что для моделей регрессии на главные компоненты достаточно 3-х главных компонент.

В таблице 5.6 представлены нагрузки на главные компоненты. Жирным выделены максимальные нагрузки для каждой компоненты. Анализируя таблицу, можно предположить, что первые главные компоненты для всех трех моделей связаны с наблюдаемыми переменными  $X1$  и  $X3$ , вторые – с переменной  $X1$ . Модели РСА-регрессии имеют вид, описываемый формулами (5.8)–(5.10):

$$Y1 = 0,2705 \cdot \text{Comp1} - 0,2737 \cdot \text{Comp2} - 0,3146 \cdot \text{Comp3} + 3,0480; \quad (5.8)$$

$$Y2 = 0,2877 \cdot \text{Comp1} - 0,2801 \cdot \text{Comp2} - 0,4712 \cdot \text{Comp3} + 3,8435; \quad (5.9)$$

$$Y3 = -0,0007 \cdot \text{Comp1} + 0,0423 \cdot \text{Comp2} + 0,3338 \cdot \text{Comp3} + 2,6620. \quad (5.10)$$

На рисунке 5.7 приведены временные ряды предсказанных по моделям регрессии на главные компоненты значений  $Y1$ – $Y3$  и их реальных значений, взятых из тестовой выборки.

Таблица 5.4 – Факторные нагрузки на главные компоненты

Переменная Y1			
	Comp 1	Comp 2	Comp 3
X1	0,534889	0,7994	0,005413
X2	0,398771	-0,1692	0,120405
X3	0,412480	-0,2179	0,129931
X4	0,386992	-0,1816	0,096542
X5	0,364031	-0,1692	0,081301
Y2	0,320020	-0,4282	-0,552238
Y3	-0,006545	0,1998	-0,804794
Переменная Y2			
	Comp 1	Comp 2	Comp 3
X1	0,55970	0,7806	0,25753
X2	0,40306	-0,2303	-0,03765
X3	0,41448	-0,2767	-0,02087
X4	0,39016	-0,2368	-0,06485
X5	0,36808	-0,2223	-0,07981
Y1	0,25419	-0,2000	-0,30399
Y3	-0,01278	0,3398	-0,91041
Переменная Y3			
	Comp 1	Comp 2	Comp 3
X1	0,4858	0,79946	0,3526
X2	0,3825	-0,07176	-0,3279
X3	0,3974	-0,11376	-0,3217
X4	0,3719	-0,08859	-0,3197
X5	0,3512	-0,08713	-0,2885
Y1	0,2830	-0,29908	0,3277
Y2	0,3435	-0,48773	0,6098

Исходя из визуального анализа, можно сделать вывод о плохом качестве модели РСА-регрессии на Y2 и Y3.

Для проведения сравнительного анализа качества полученных моделей рассмотрим количественные показатели, отражающие разные аспекты качества регрессионных моделей. Введем следующие обозначения:  $\hat{\varepsilon}_i$  – отклонения выборочных величин  $z_i$  переменной-отклика от значений  $\hat{z}_i$ , получаемых по уравнению регрессии,  $\bar{z}$  – среднее значение переменной-отклика  $z$ ,  $n$  – объем выборки,  $k$  – количество параметров модели.

Общая сумма квадратов, TSS, отражает общий разброс значений зависимой переменной без учета регрессионной модели:  $TSS = \sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2$ .

Сумма квадратов остатков, RSS, является оценкой остаточной дисперсии значений переменной-отклика, которую не удалось объяснить при помощи построенной модели:  $RSS = \sum_{i=1}^n \hat{\varepsilon}_i^2$ .

RSE – стандартное отклонение остатков модели, является оценкой разброса наблюдаемых значений зависимой переменной относительно истинной линии регрессии. RSE в общем виде рассчитывается как  $RSE = \sqrt{RSS / (n - k - 1)}$ .

Коэффициент детерминации  $R^2$  измеряет долю общей дисперсии зависимой переменной, объясненную моделью, и изменяется от 0 до 1. Чем ближе значение  $R^2$  к 1, тем точнее модель описывает данные:  $R^2 = 1 - RSS / TSS$ .

Дисперсионное отношение Фишера (F-статистика) представляет собой отношение дисперсий и используется для проверки нулевой гипотезы о статистической незначимости уравнения регрессии в целом:

$$F = \frac{(TSS - RSS) / k}{RSS / (n - k - 1)}.$$

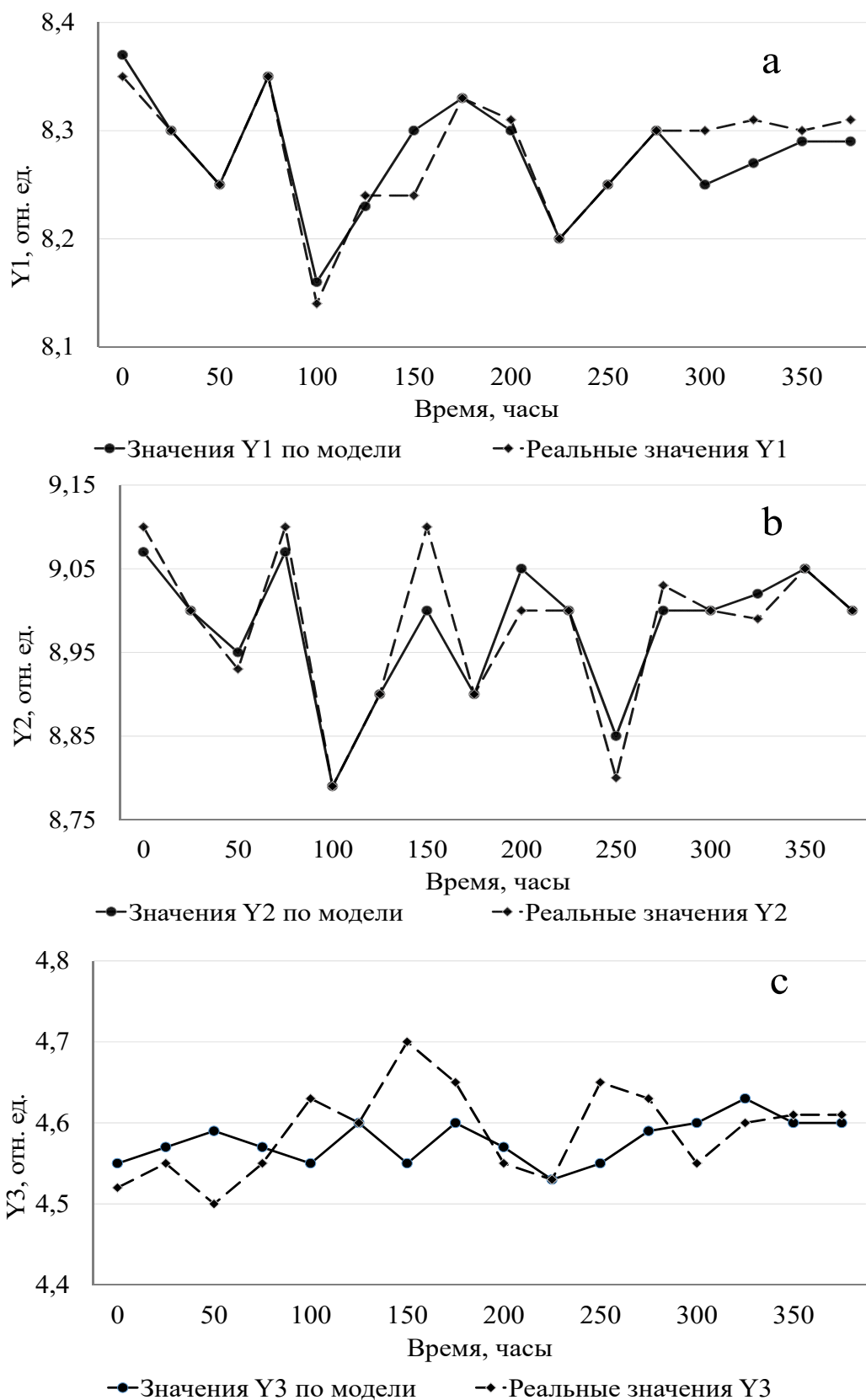


Рисунок 5.7 – Временные ряды предсказанных по модели РСА-регрессии значений и реальных значений для переменной Y1, Y2 и Y3 (рисунки а, б и с соответственно)

Современные подходы к выбору хорошо интерпретируемых моделей оптимальной сложности ориентируются на применение информационных критериев, основанных на функции максимального правдоподобия и более чувствительных к увеличению числа параметров модели. В данной работе для сравнения моделей с разным числом параметров использовался информационный критерий Акаике:  $AIC = n \cdot \ln(\sum \hat{\varepsilon}_i^2 / n) + 2k$ .

В нашем случае сравнения моделей на выборках одинаковой длины выражение можно упростить, выкидывая члены, зависящие только от  $n$ :  $AIS = n \cdot \ln(RSS) + 2k$ .

Считается, что наилучшей будет модель с наименьшим значением критерия  $AIC$ .

Для предсказания  $Y_1$ - $Y_3$  нами были получены следующие регрессионные модели: линейная регрессия с исключёнными коллинеарными предикторами, гребневая и лассо-регрессия, которые совпали, а также регрессия на главные компоненты. Все модели имеют разное число параметров. Качество полученных моделей оценим по тестовой выборке по критериям, описанным во втором разделе. Результаты исследования качества моделей сведены в таблицу 5.5.

Из значений критериев качества, приведенных в таблице 4.5, можно заключить следующее:

- а) для моделей с переменной-откликом  $Y_1$  и  $Y_2$ :
  - все модели статистически значимы в целом, поскольку значение  $F$ -статистики гораздо больше 1, что соответствует  $p$ -значению  $< 1,032e-15$ ;
  - наиболее значимой по значению критерия  $AIC$  является модель гребневой регрессии;
  - наихудшей из рассмотренных моделей является РСА-регрессия; значение  $R^2$  для РСА-регрессии на  $Y_2$  близко к 0,5, это свидетельствует о том, что модель может не отражать реальное положение вещей;

Таблица 5.5 – Значения качественных показателей для полученных моделей

Линейная регрессия с неколлинеарными предикторами						
Переменная-отклик	TSS	RSS	RSE	R2	F-статистика	AIC
Y1	0,757	0,037	0,010	1,000	887,488	-1251,392
Y2	1,544	0,096	0,016	0,938	690,717	-889,354
Y3	1,150	1,021	0,052	0,112	1,614	15,918
Гребневая (лассо-) регрессия						
Y1	0,757	0,033	0,009	1,000	569,652	-1289,793
Y2	1,544	0,085	0,015	0,945	450,077	-932,229
Y3	1,150	0,934	0,050	0,188	1,958	-10,148
РСА-регрессия						
Y1	0,757	0,113	0,017	0,999	331,645	-829,008
Y2	1,544	0,741	0,044	0,520	46,914	-106,900
Y3	1,150	1,057	0,053	0,081	0,833	29,229

б) для моделей с переменной-откликом Y3:

- все модели имеют низкие коэффициенты детерминации, что не позволяет использовать их для предсказания Y3;
- значение  $F$ -статистики ниже критического на уровне значимости  $\alpha = 0,05$ , следовательно, принимается нулевая гипотеза о статистической незначимости уравнения регрессии в целом;
- наилучшей для предсказания Y3 среди рассмотренных моделей является гребневая регрессия.

#### 5.4.2 Особенности построения моделей режимов работы водораспределительных сетей на основе ансамблей классификаторов и нейросетевого подхода

При решении поставленной задачи выполнены следующие работы:

- проведен разведочный анализ данных для выявления выбросов и пропущенных значений, а также наличия связи между переменными;
- используя методы машинного обучения, построены предсказательные модели для показаний датчиков давления воды в неактивных точках водораспределительной сети;
- проведена оценка значимости предикторов для каждой модели;
- проведен анализ эффективности построенных моделей, используя в качестве критерия коэффициент детерминации:

$$R^2 = 1 - \sum \hat{\varepsilon}_i^2 / \sum (y_i - \bar{y})^2, \quad (5.11)$$

где  $\hat{\varepsilon}_i$  – отклонения выборочных величин  $y_i$  переменной-отклика от значений  $\hat{y}_i$ , получаемых по модели,  $\bar{y}$  – среднее значение переменной-отклика  $y$ .

Для заполнения пропущенных значений и выбросов использовалась сплайновая интерполяция со сплайнами Акима, для выявления характера связи между переменными – матричные диаграммы рассеяния. Использованы два подхода к построению предсказательных моделей: на основе ансамблей классификаторов и нейросетевого подхода [221]. Для построения ансамбля классификаторов выбрана техника градиентного бустинга над решающими деревьями. Данные были разбиты на обучающую и тестовую выборки (доля обучающей выборки – 0,8). После чего были построены три модели, в качестве переменной-отклика поочередно брались  $y_j$  ( $j=1, 2, 3$ ). Оценка эффективности каждой модели проводилась с помощью коэффициента детерминации  $R^2$ . Для каждой модели оценивалась важность предикторов, используя алгоритм *Random*

*Forest.* По рисункам 5.8–5.10 можно визуально оценить результаты прогнозирования каждой из моделей, на рисунках отображены предсказанные (*pred*) и реальные (*test*) нормированные значения тестовой выборки для переменных-откликов  $y_1$ – $y_3$ , взятые за одни сутки.

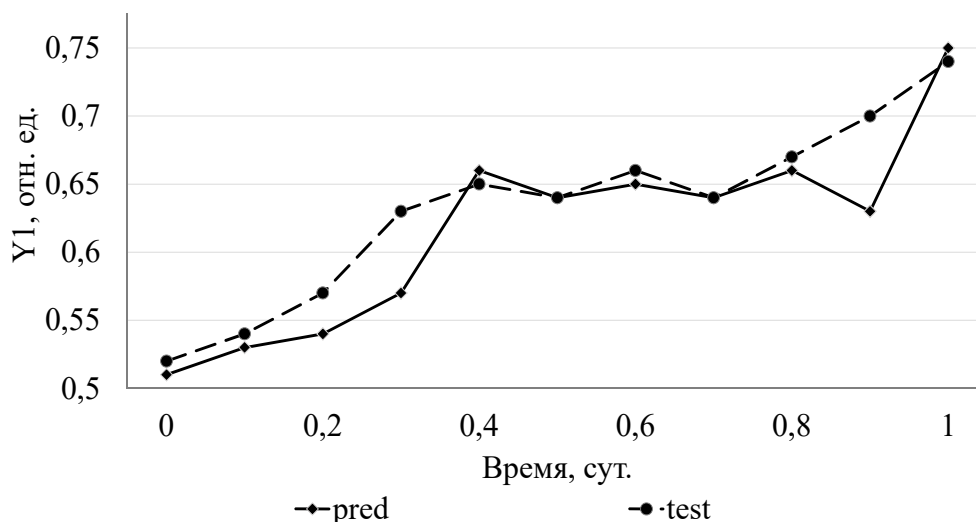


Рисунок 5.8 – Диаграмма рассеяния между нормированными переменными time и Y1, построенная для реальных и предсказанных значений переменной-отклика Y

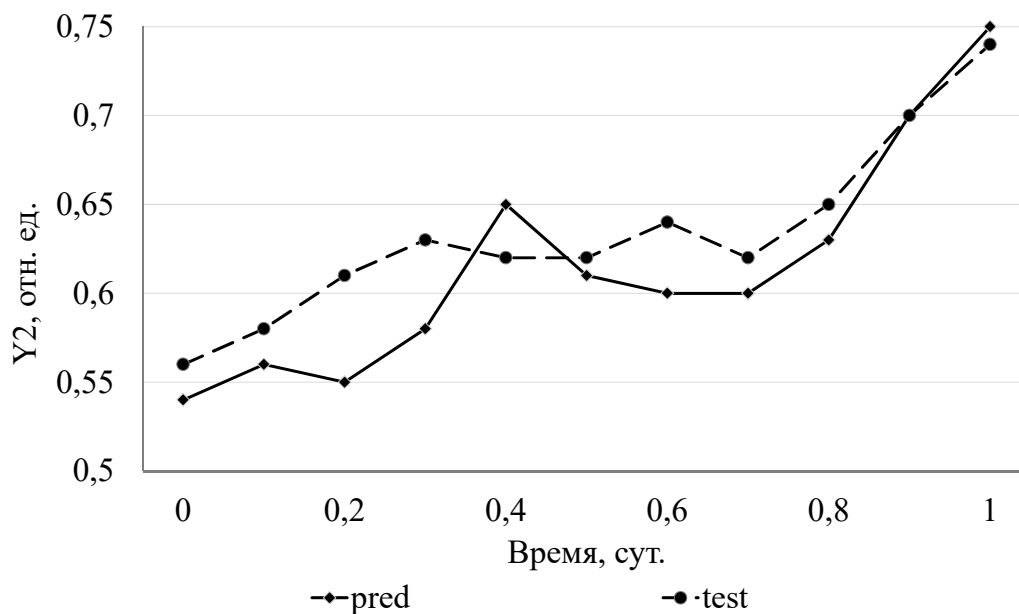


Рисунок 5.9 – Диаграмма рассеяния между нормированными переменными time и Y2, построенная для реальных и предсказанных значений переменной-отклика y

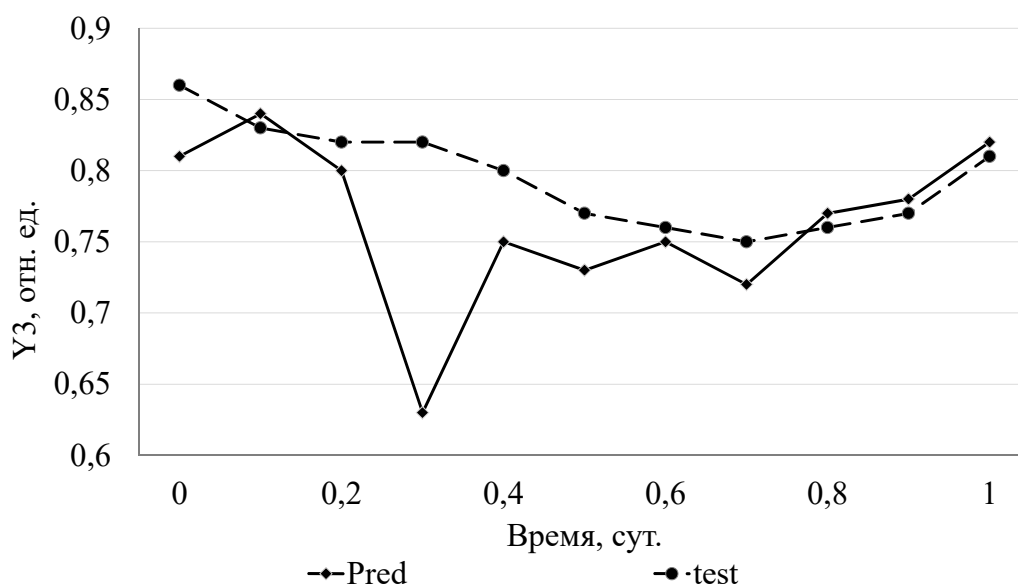


Рисунок 5.10 – Диаграмма рассеяния между нормированными переменными  $time$  и  $Y_3$ , построенная для реальных и предсказанных значений переменной-отклика  $y$

Для построения нейросетевой модели использовались рекуррентные нейросети (*Recurrent Neural Networks, RNN*). В данной работе, поскольку анализируемые данные представляют собой временные ряды, использовалась BLSTM-сеть. Входная последовательность  $(t, x_1(t), x_2(t), \dots, x_5(t))$ , где  $x_i(t)$  – показания датчика активной  $i$ -той точки в момент времени  $t$ . Выходная последовательность –  $(y_1(t), y_2(t), y_3(t))$ , где  $y_j(t)$  – прогнозируемые показания датчика неактивной  $j$ -той точки. Значения предсказанных (pred) и реальных (test) нормированных значений  $y_1$ – $y_3$  в зависимости от нормированной переменной  $time$  приведены на рисунках 5.11–5.13.

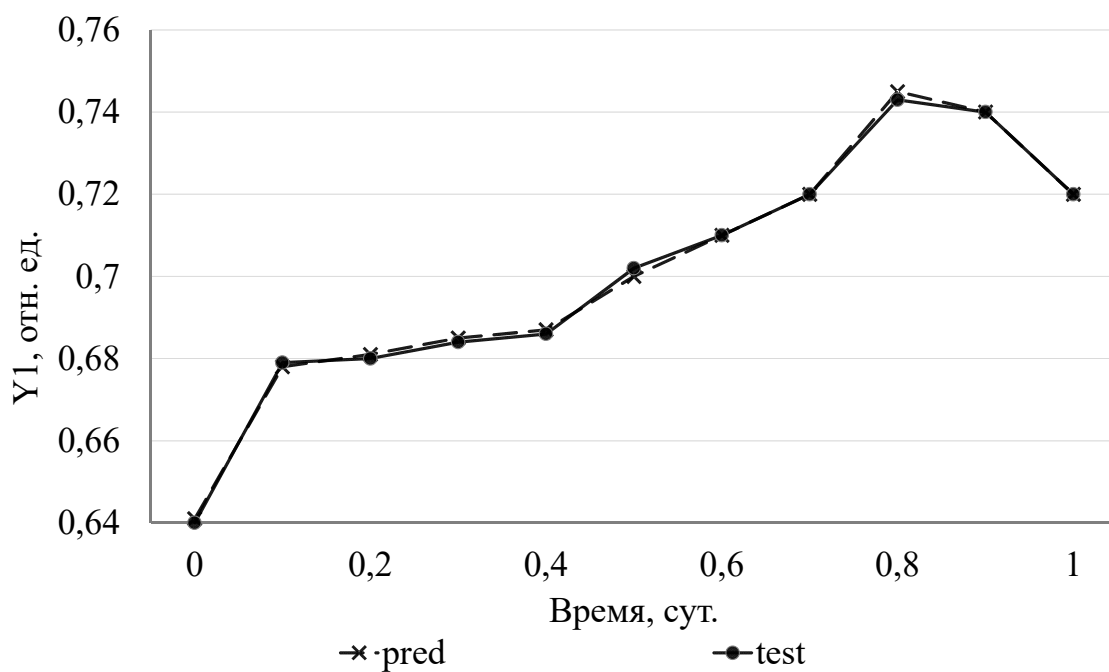


Рисунок 5.11 – Нормированные значения из тестовой выборки за сутки и значения, полученные нейросетевой моделью, для переменной Y1

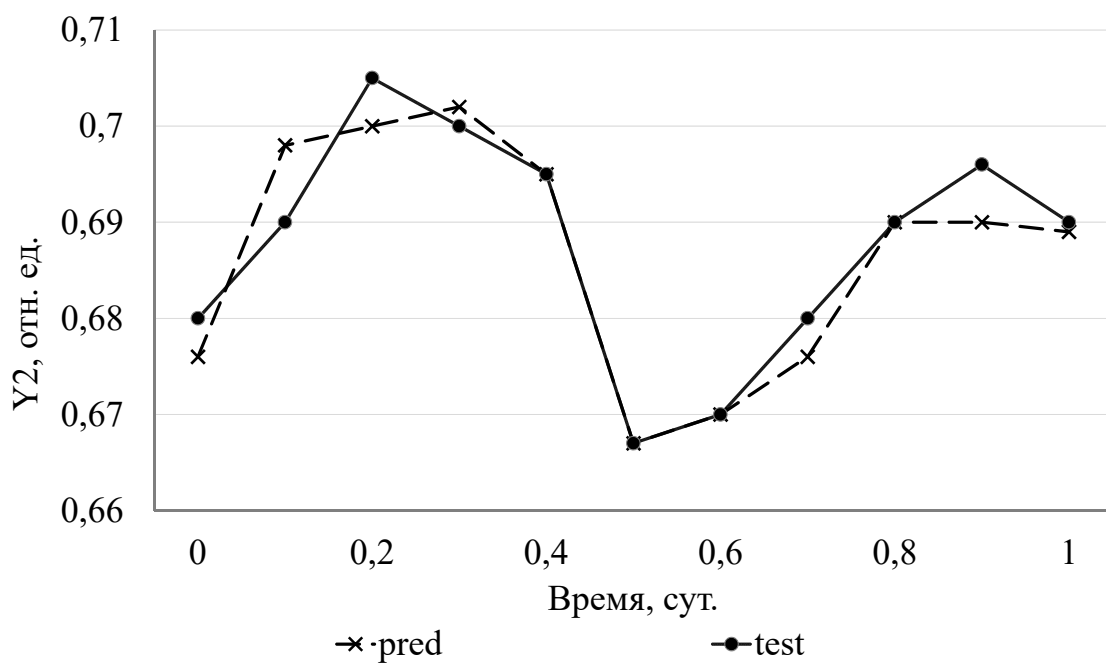


Рисунок 5.12 – Нормированные значения из тестовой выборки за сутки и значения, полученные нейросетевой моделью, для переменной Y2

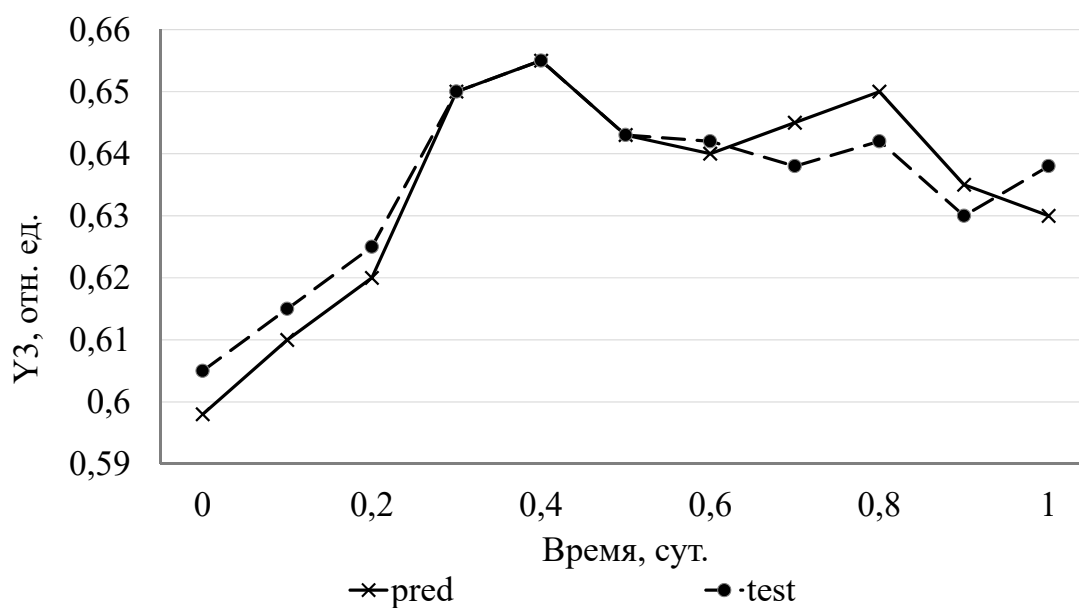


Рисунок 5.13 – Нормированные значения из тестовой выборки за сутки и значения, полученные нейросетевой моделью, для переменной Y3

Сравнивая рисунок 5.10 и рисунок 5.13, можно сделать вывод о большей точности нейросетевой модели и о верном выборе типа нейросети – BLSTM, способной, в отличие от деревьев решений, учитывать для предсказания текущих значений временных последовательностей их контекст и слева, и справа.

Полученные в данной главе результаты говорят о перспективах применения предложенных методов мониторинга пространственно-распределенных водных объектов.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Изменение №3 к СП 42.13330.2016 "СНиП 2.07.01-89\* Градостроительство. планировка и застройка городских и сельских поселений". – 89 с. Утв. приказом Минстроя России от 9.06.2022 №473/пр.
2. Российская Федерация. Законы. Градостроительный кодекс Российской Федерации: Федер. закон [принят Гос. Думой 22.12.2004, одобрен Советом Федерации 24.12.2004]. – М., 2004. (№190-ФЗ. от 29.12.04, с изм. и доп., вступ. в силу с 01.09.2018, актуальный закон).
3. "СП 42.13330.2016. Свод правил. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. Актуализированная редакция СНиП 2.07.01-89" (Утв. Приказом Минстроя России от 30.12.2016 №1034/пр). с изм. 31.05.2022. – М., 2016. – 150 с.
4. Разработка предложений по актуализации СП 42.13330.2016 «Свод правил. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. Актуализированная редакция СНиП 2.07.01-89\*». Редакция 2.0. Заказчик: «НОПРИЗ». Исполнитель: ООО ЦАРН». Договор №СП-42.13330.2016 от 27.08.21. – М., 2022. – 215 с.
5. Концепция Стратегии пространственного развития Российской Федерации на период до 2030 года. – М.: Минэкономразвития РФ, 2016. – 111 с.
6. База данных индикаторов развития стран мира Всемирного банка. – Электр. ресурс. URL: <http://data.worldbank.org/> (28.09.24).
7. 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.

8. Briggs, David. 1999. Environmental Health Indicators: Framework and Methodologies. Geneva, Nene Centre for Research, University College Northampton, WHO, 119 p.
9. European Community. Air Quality Standards. Available at: <http://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.htm> (accessed May 29, 2024).
10. 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.
11. 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 September 19, 2024).
12. The City Development Index (CDI). The State of the World's Cities. UN-Habitat, 2001: 116–119.
13. Environmental Pressure Indicators for the EU. Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities, 2001, 165 p.
14. Identification, Monitoring, Indicators and Assessment. Available at: <http://www.cbd.int/indicators/intro.shtml> (accessed September 23, 2024).
15. Better understanding our cities. The role of urban indicators. Lawrence R.J. Paris, Organisation for Economic Co-Operation and Development, 1997, 94 p.
16. Защита окружающей среды Европы – Четвертая оценка. Европейское агентство по окружающей среде. – Копенгаген. Дания: Schultz Grafisk, 2007. – 452 с.
17. Экологические показатели и основанные на них оценочные доклады. Восточная Европа, Кавказ и Центральная Азия. – Нью-Йорк, Женева: ООН. 2007. – 110 с.
18. Артюхов В.В. Системная методология оценки устойчивости природно-антропогенных комплексов: теория, алгоритмы, количественные

- оценки / В.В. Артюхов, А.С. Мартынов, 2013. – 142 с. – Электр. рес.  
URL: <http://www.sci.aha.ru/ots/Metodology.pdf>; [www.sci.aha.ru](http://www.sci.aha.ru) (27.09.24).
19. Доклад «Живая планета» / Всемирный фонд дикой природы. Пер. с англ. 2006, 2008, 2010, 2012, 2014, 2016, 2018, 2020, 2022, 2024. – Электр. рес. URL: <https://mywwf.ru/resources/publ>; <https://wwflpr.awsassets.panda.org/downloads/2024-living-planet-report-a-system-in-peril.pdf> (15.02.25).
20. Доклад о человеческом развитии 2014. «Обеспечение устойчивого прогресса человечества: уменьшение уязвимости и формирование жизнестойкости» / Пер. с англ.; ПРООН. – М.: Весь мир, 2014. – 280 с.
21. Какарека С.В. Методические подходы к оценке суммарного загрязнения атмосферного воздуха // Природопользование: Сб. научн. тр. – Минск: СтройМедиаПроект, институт природопользования, 2014. Вып. 25. – С. 61–69.
22. Яйли Е.А. Научные и прикладные аспекты управления урбанизированными территориями на основе инструмента риска и новых показателей качества окружающей среды / Под ред. Карлина Л.Н. – СПб.: РГГМУ, ВВМ, 2006. – 448 с.
23. Интегральная оценка экологического состояния и качества среды городских территорий / А.Ф. Алимов [и др.] / Под ред. А.К. Фролова. – СПб.: СПбНЦ РАН, 1999. – 253 с.
24. 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 университет. – Донецк, 2006. – 213 с. – Библиогр.: с. 169–181.
25. 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.

26. Музалевский А.А. Индексы и составляющие экологического риска в оценке качества городской экосистемы / А.А. Музалевский, В.А. Исидоров // Вестник СПб. ун-та. Сер. 4. – 1998. – № 11. – Вып. 2. – С. 74–83.
27. Manual of Industrial Hazard Assessment Techniques. Office of Environmental and Scientific Affairs, World Bank. Washington, DC, 1985, 188 p.
28. Звягинцева А.В. Вероятностные методы комплексной оценки природно-антропогенных систем / Под науч. ред. д.т.н., проф. Г.В. Аверина. – М.: Спектр, 2016. – 257 с.
29. Компаниец В.С. Социально-экономическое состояние «типичных» муниципальных образований. Методика комплексной оценки / В.С. Компаниец, М.А. Боровская, А.Ю. Казанская. – Saarbrücken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2011. – 280 с.
30. Методика формирования индекса качества городской среды (с изм. на 20.09.2023). Утв. Распоряжением Правительства РФ от 23.03.2019 №510-Р, 2019. – 43 с. – Элект. рес. URL: [https://fin-gov.ru/wp-content/uploads/2024/03/ob\\_utverzhdenii\\_metodiki\\_formirovaniya\\_indekса\\_kachestva\\_gorodskoj\\_sredy\\_s\\_izmeneniyami\\_na\\_20\\_sentyabrya\\_2.pdf](https://fin-gov.ru/wp-content/uploads/2024/03/ob_utverzhdenii_metodiki_formirovaniya_indekса_kachestva_gorodskoj_sredy_s_izmeneniyami_na_20_sentyabrya_2.pdf) (20.09.24).
31. Методические рекомендации по геохимической оценке загрязнения территории городов химическими элементами. – М.: МГРЭ, 1982. – 111 с.
32. 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: <https://law.rufox.ru/view/9/2707.htm> (27.09.24).
33. 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](http://businesspravo.ru/Docum/DocumShow_DocumID_10592.html)

(19.09.24).

34. РД 52.04.186-89. Руководство по контролю загрязнения атмосферы. – М.: Гос. ком. СССР по гидрометеорологии – Минздрав СССР, 1991. – 691 с.
35. 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.
36. Рекомендации по качеству воздуха в Европе / Пер. с англ. – М.: Весь мир, 2004. – 312 с.
37. 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](https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-11/documents/eco_risk_assessment1998.pdf) (accessed September 29, 2024).
38. Фомин Г.С., Фомина О.Н. Воздух. Контроль загрязнения по международным стандартам. Справочник. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Протектор, 2002. – 432 с.
39. Air quality guidelines for Europe. Second edition. Regional publications. Copenhagen, WHO Regional office for Europe, 2000, 288 p.
40. Звягинцева А.В. Количественная оценка рисков в экологической безопасности. Ч. 1, 2 / А.В. Звягинцева, Г.В. Аверин // Вісник Донецького університету. Сер. Природничі науки. – 2006. – № 2. – С. 296–304; 2007. – № 1. – С. 293–301.
41. Матвеева А.А. Экологические параметры социально-экономического развития региональных систем / А.А. Матвеева, С.Н. Кириллов, А.В. Холоденко. – Волгоград: ВолГУ, 2012. – 193 с.

42. Константинов И.С. Комплексная оценка состояния урбанизированных территорий / И.С. Константинов, А.В. Звягинцева // Градостроительство и архитектура. – 2018. – Т. 8, № 1. – С. 63–71.
43. Шитиков В.К. Количественная гидроэкология: методы системной идентификации / В.К. Шитиков, Г.С. Розенберг, Т.Д. Зинченко. – Тольятти: ИЭВБ РАН, 2003. – 463 с.
44. Мамонов В.И. Системный анализ в проблеме управления качеством окружающей среды города / В.И. Мамонов, В.Г. Мамонова. – Новосибирск: НГТУ, 2016. – 269 с.
45. Бадалян Л.Х. Развитие методологии оценки загрязнения атмосферного воздуха и снижения ущерба экосистеме города / Л.Х. Бадалян, В.Н. Курдюков. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2015. – 162 с.
46. База данных Федеральной службы государственной статистики. Регионы России. Охрана окружающей среды в России. Стат. сб. / Росстат. – Электр. рес.: офиц. сайт. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13209> (27.09.24).
47. Звягинцева А.В. Теоретические основы событийной оценки состояния и развития урбанизированных территорий. Дис. ... доктора техн. наук: 05.13.01 / ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет». – Белгород, 2018. – 486 с. – Библиогр.: с. 361–402.
48. Многокритериальные географо-экологические оценки состояния и устойчивости природных и урбанизированных систем / Л.В. Александрова, В.Ю. Васильев, В.В. Дмитриев и др. // Под ред. В.В. Дмитриева и Н.В. Хованова. – Деп. ВИНТИ №2342В00, 2000. – 275 с.
49. Звягинцева А.В. Изучение развития городов на основе моделей макроскопического описания городских подсистем // Информационные системы и технологии. – 2018. – № 4(108). – С. 5–15.

50. Форрестер Дж. Динамика развития города: пер. с англ. – М.: Прогресс, 1974. – 224 с.
51. Dixon, T. 2011. Sustainable Urban Development to 2050: Complex Transitions in the Built Environment of Cities. Oxford Institute for Sustainable Development. Oxford Brookes University, 385 p.
52. Guide to City Development Strategies Improving Urban Performance. Washington, D.C.: The Cities Alliance, 2006, 80 p. Available at: <https://www.citiesalliance.org/sites/default/files/2019-07/370820cds1guidelines01PUBLIC1.pdf> (accessed September 19, 2024).
53. International Guidelines on Urban and Territorial Planning. UN-Habitat, 2015, 40 p. Available at: <https://unhabitat.org/books/international-guidelines-on-urban-and-territorial-planning/> (accessed September 21, 2024).
54. Мэгарран Э. Экологическое разнообразие и его измерение. – М.: Мир, 1992. – 184 с.
55. Николаевский В.С. Методика определения предельно допустимых концентраций вредных газов для растительности / В.С. Николаевский, Т.В. Николаевская. – М.: МЛИ Госкомплес СССР, 1988. – 15 с.
56. Сафонов В.С., Одишария Г.Э., Швыряев А.А. Теория и практика анализа риска в газовой промышленности. – М.: Олита, 1996. – 207 с.
57. Аверин Г.В. Закономерности формирования опасных процессов в сложных системах / Г.В. Аверин, А.В. Звягинцева // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка. – Вип. 9(132), 2008. – С. 221–232.
58. Аверин Г.В. Системодинамика: теория и приложения / Г.В. Аверин. – Донецк: НПП Фолиант, 2022. – 535 с.
59. Бондарик Г.К. Научные основы и методика организации мониторинга крупных городов / Г.К. Бондарик, Л. Чан Мань, Л.А. Ярг. – М.: ПНИИИС, 2009. – 259 с.

60. Куценко С.А. Основы токсикологии. – СПб.: Военно-медицинская академия им. С.М. Кирова, 2002. – 395 с.
61. Toxicology and Risk Assessment. Anna M. Fan, George Alexeeff, Elaine Khan. California, USA, Pan Stanford Publishing, 2015, 1426 p.
62. Медоуз Д.Х., Медоуз Д.Л., Рандерс Й. За пределами роста. – М.: Прогресс, 1994. – 296 с.
63. Дружинин А.Г. Устойчивое развитие территориальных социально-экономических систем: теория и практика моделирования / А.Г. Дружинин, Г.А. Угольницкий. – М.: Вузовская книга, 2013. – 224 с. – Электр. рес. URL: <http://www.mtas.ru/upload/library/URT2013.pdf> (26.09.24).
64. Averin G.V., Zviagintseva A.V., Konstantinov I.S. and Svetsova A.A. Forecasting indicators of territorial entity based on phenomenological models of collective behavior. *Amazonia investiga*. 2018. Vol.7, no 13: 42–49.
65. 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.
66. Mathematical modeling of collective behavior in socio-economic and life sciences / G. Naldi, L. Pareschi, G. Toskani (eds.). Berlin, Springer, 2010, 438 p.
67. Вайдлих В. Социодинамика: системный подход к математическому моделированию в социальных науках. Пер. с англ. С.Л. Котлярова; под ред. Ю.С. Попкова и А.Е. Семечкина. – 3-е изд., стер. – М.: URSS, 2010. – 480 с.
68. Encyclopedia of complexity and systems science / R.A. Meyers (Editor-in-chief). Berlin, Springer, 2009, 10370 p.

69. Путилов В.А., Горохов А.В. Системная динамика регионального развития. – Мурманск: НИЦ «Пазори», 2002. – 304 с.
70. Перцик Е.Н. Города мира. География мировой урбанизации / Е.Н. Перцик. – М.: Международные отношения, 1999. – 384 с.
71. Перцик Е.Н. Проблемы развития городских агломераций / Academia, № 2, 2009. – С. 63–69.
72. Малоян Г.А. Агломерация – градостроительные проблемы / Г.А. Малоян. – М: Ассоциация строительных вузов, 2010. – 120 с.
73. Harris C.D. 1970. Cities of the Soviet Union: Studies of their. Functions, Size, Density and Growth. Chicago, Rand McNally, 484 p.
74. Трейвиш А.И. Город, район, страна и мир. Развитие России глазами страноведа. – М.: Новый хронограф, 2009. – 372 с.
75. Антонов Е.В. Исследования городской системы и агломераций в России / Е.В. Антонов, Н.К. Куричев, А.И. Трейвиш // Известия РАН. Серия географическая. – 2022. – Т. 86, № 3. – С. 310–331.
76. Marshall J.U. 1989. The Structure of Urban Systems. Toronto, University of Toronto Press, Toronto, 394 p.
77. Лола А.М. Основы градоведения и теории города в российской интерпретации: в 2-х томах. – М.: Новая реальность, 2021. – Т.1 – 343 с.; Т.2 – 230 с.
78. Звягинцева А.В. Выявление взаимосвязи сложных событий на примере анализа статистических данных о чрезвычайных ситуациях / А.В. Звягинцева, Т.К. Гучмазова, Р.В. Клеменюк // Вестник ДонНУ. Сер. Г: Технические науки. – 2024. – № 3. – С. 45–54.
79. Мэддисон, Ангус: Мировая экономика. Тысячелетняя перспектива (Том 1). Историческая статистика (Том 2), OECD 2006. – 629 с. – Электр. рес. URL: <https://web.archive.org/web/20080513232041/http://www.theworlddeconomy.org/publications/worlddeconomy/> (28.09.24);

- <https://web.archive.org/web/20080509123723/http://www.theworlddeconomy.org/publications/worlddeconomy/statistics.htm> (28.09.24).
80. Heinz Von Foerster, Patricia M. Mora and Lawrence W. Amiot. Doomsday: Friday, 13 November, A.D. 2026. *Science, New Series*, Vol. 132, no 3436 (Nov. 4, 1960): 1291–1295.
  81. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2018). *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision. Urban and Rural Populations*. Online Edition. Available at: <https://population.un.org/wup/downloads> (accessed February 27, 2025).
  82. Orders of magnitude of the world's urban population in history. Prepared by the Population Division of the Department of Economic and Social Affairs. 1977, Population division reference centre, 40 p. Available at: <https://population.un.org/wup/archive> (accessed September 24, 2024).
  83. *Population studies*, no. 44. Growth of the world's urban and rural population, 1920–2000. Department of Economic and Social Affairs. United Nations, New York, 1969. Printed in the etherlands, 124 p.
  84. US Census Bureau, Demographic Internet Staff. *Historical Estimates of World Population*. Available at: [https://web.archive.org/web/20170928104211/https://www.census.gov/population/international/data/worldpop/table\\_history.php](https://web.archive.org/web/20170928104211/https://www.census.gov/population/international/data/worldpop/table_history.php) (accessed September 21, 2024).
  85. *Народонаселение: энциклопедический словарь*. Гл. ред. Г.Г. Меликьян. – М.: Большая российская энциклопедия, 1994. – 639 с.
  86. *Население Земли*. – Электр. рес. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Население\\_Земли](https://ru.wikipedia.org/wiki/Население_Земли) (20.09.24).
  87. *Численность населения в мире по годам*. – Электр. рес. URL: <https://total-rating.ru/1918-chislennost-naseleniya-v-mire-po-godam.html> (20.09.24).
  88. Chandler, Tertius. 1987. *Four thousand years of urban growth: an historical census*. Lewiston, N.Y., U.S.A., St. David's University Press, 656 p.

89. World Urbanization Prospects: The 2018 Revision (ST/ESA/SER.A/420). New York, United Nations. Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2019, 103 p.
90. Dalkhat Ediev. Application of the Demographic Potential. Concept to Understanding the Russian. Population History and Prospects: 1897–2100. *Demographic research*. Vol. 4, article 9, 2001: 289–336. Available at: [www.demographic-research.org/Volumes/Vol4/9/](http://www.demographic-research.org/Volumes/Vol4/9/) (accessed September 21, 2024).
91. Рашин А.Г. Население России за 100 лет (1813–1913). Статистические очерки. Под ред. академика С.Г. Струмилина. Государственное статистическое издательство. – М., 1956. – Электр. рес. URL: <https://istmat.org/node/30> (25.09.24).
92. Милюков П.Н. Очерки по истории русской культуры. Ч. 1: Население, экономический, государственный и сословный строй. – СПб: Тип. И.Н. Скороходова, 1896. – 223 с. – Электр. рес. URL: <https://runivers.ru/lib/book3111/> (28.09.24).
93. Федеральная служба государственной статистики. Официальная статистика. Население. Демография. – Электр. рес.: офиц. сайт. URL: [https://web.archive.org/web/20141107182445mp\\_/http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat\\_main/rosstat/ru/statistics/population/demography/#](https://web.archive.org/web/20141107182445mp_/http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/population/demography/#) (28.09.24); <https://rosstat.gov.ru/folder/12781> (28.09.24).
94. Демографический ежегодник России 2002–2023. – Электр. рес.: офиц. сайт. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13207> (28.09.24).
95. Предположительная численность населения Российской Федерации до 2045 года по среднему варианту прогноза / Статистический бюллетень. – М., 2023 (размещено 29.12.2023). – Электр. рес.: офиц. сайт. URL: <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13285>; Демографический прогноз (размещено 29.12.2023) – Электр. рес.: офиц. сайт. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/12781> (20.09.24).

96. Коротаев А.В. Математическая модель роста населения Земли, экономики, технологии и образования / А.В. Коротаев, А.С. Малков, Д.А. Халтурина // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. – 2005. – № 13. – С. 1–39. – Электр. рес. URL: [https://keldysh.ru/papers/2005/prep13/prep2005\\_13.html](https://keldysh.ru/papers/2005/prep13/prep2005_13.html) (28.09.24).
97. Народное хозяйство СССР в 1977 году: Стат. ежегодник / ЦСУ СССР. – М.: Статистика, 1978. – 654 с. – Электр. рес. URL: [https://alldata.narod.ru/USSR\\_1977/](https://alldata.narod.ru/USSR_1977/) (28.09.24).
98. Department of International Economic and Social Affairs Population studies, no 68 Patterns of urban and rural population growth. United Nations New York, 1980, 184 p. Available at: <https://population.un.org/wup/archive> (accessed September 24, 2024).
99. Демографическая модернизация России, 1900–2000. Под ред. А.Г. Вишневого. – М.: Новое издательство, 2006. – 601 с.
100. Российский статистический ежегодник. 2007: статистический сборник. – М.: Росстат, 2007. – 826 с. – Электр. рес.: офиц. сайт. URL: [https://rosstat.gov.ru/bgd/regl/b07\\_13/Main.htm](https://rosstat.gov.ru/bgd/regl/b07_13/Main.htm) . Раздел 4.2. Численность населения. – Электр. рес.: офиц. сайт. URL: [https://rosstat.gov.ru/bgd/regl/b07\\_13/IssWWW.exe/Stg/d01/04-02.htm](https://rosstat.gov.ru/bgd/regl/b07_13/IssWWW.exe/Stg/d01/04-02.htm) (23.09.24).
101. Общее и городское население России (2025 год и историческое). – Электр. рес. URL: <https://www.worldometers.info/world-population/russia-population/> (29.09.24).
102. Население России за 100 лет (1897–1997): Стат. сб. / Госкомстат России. – М., 1998. – 222 с. – Электр. рес. URL: <https://www.booksite.ru/fulltext/nasel/text.pdf> (27.09.24).
103. Статистика: Городское и сельское население России. – Электр. рес. URL: [https://ruxpert.ru/Статистика:Городское\\_и\\_сельское\\_население\\_России](https://ruxpert.ru/Статистика:Городское_и_сельское_население_России) (29.09.24).

104. Population statistics: historical demography of all countries, their divisions and towns. Russia. Historical demographical data of the whole country. Available at: <https://web.archive.org/web/20170707234550/http://www.populstat.info/Europe/russiac.htm>; <http://populstat.info/Europe/russiac.htm> (accessed September 21, 2024).
105. Андреев Е.М., Дарский Л.Е., Харьковская Т.Л. Демографическая история России: 1927–1959. НИИ статистики Госкомстата России. Отделение демографии. Демографические исследования. Вып. 12. – М.: Информатика, 1998. – 187 с.
106. Великая Отечественная война. Юбилейный статистический сборник: Стат. сб. / Росстат. – М., 2020. – 299 с.
107. Диканский М.Г. Постройка городов (их план и красота). – СПб.: Изд-во Н.П. Карбасникова, 1915. – 316 с.
108. Волков Е.З. Динамика народонаселения СССР за 80 лет. – М-Ленинград: Государственное изд-во, 1930. – 271 с.
109. Мавлютов Р.Р. Пространственное развитие крупных городов России в период постиндустриального перехода [Электронный ресурс]. – Волгоград: ВолгГАСУ, 2015. – 161 с.
110. Demographia World Urban Areas. 16th Annual Edition, 2020. Available at: <http://demographia.com/db-worldua.pdf> (accessed September 21, 2024).
111. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2018). World Urbanization Prospects: The 2018 Revision. Urban Agglomeration. Online Edition. Available at: <https://population.un.org/wup/downloads?tab=Urban%20Agglomerations> (accessed February 27, 2025).
112. World Cities Report 2020 The Value of Sustainable Urbanization. UN-Habitat, 2020, 377 p.
113. Статистический ежегодник России за 1915 г. – СПб.: ЦСК МВД, 1916. – 508 с.

114. Статистический ежегодник России 1914 г. (Год одиннадцатый). – СПб.: ЦСК МВД. 1915. – 688 с. – Электр. рес. URL: <https://istmat.org/node/25514> (27.09.24).
115. Мосякин А.Г. Русское экономическое чудо // Судьба золота Российской империи в срезе истории. 1880–1922. – М.: КМК, 2017. – С. 29–35. – 657 с.
116. Статистический ежегодник Российской Империи. Тринадцать выпусков за 1904–1916 гг. – СПб.: ЦСК МВД, 1905–1917. – Электр. рес. URL: <https://istmat.org/node/21366>; <https://library6.com/index.php/item/ste> (27.09.24).
117. Городские агломерации в современной России: проблемы и перспективы развития / Пузанов А.С., Попов Р.А., Полиди Т.Д., Гершович А.Я. – М.: Фонд «Институт экономики города», 2023. – 192 с.
118. Ресин В.И. Вероятностные технологии в управлении развитием города / В.И. Ресин, Б.С. Драховский, Ю.С. Попков. – М.: Либроком, URSS. 2013. – 356 с.
119. Городское планирование для руководителей городов. Справочник. 2-е изд. / Пабло Ваджионе и др. 2013. – 331 с. Элект. рес. – URL: <http://unhabitat.ru/assets/files/publication/Hab2015.pdf> (25.09.24).
120. Методические рекомендации по разработке краткосрочных прогнозов социально-экономического развития муниципальных образований. – М.: Московский общественный научный фонд ГУ ИМЭИ Минэкономразвития России, 2002. – 143 с.
121. СП 82.13330.2016 «СНиП III-10-75 Благоустройство территорий». Утв. Приказом Минстроя РФ от 16.12.16 №972/пр). – М.: Стандартинформ, 2017. – 23 с. С изм. от 23.12.2019 №840/пр. Элект. рес. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293747/4293747629.htm> (20.09.24).

122. Методические рекомендации по согласованной подготовке и реализации документов планирования развития муниципальных образований / Л.Ю. Падилья [и др.]. – М.: Институт экономики города, 2010. – 112 с.
123. Крушлинский В.И., Сарченко В.И. Генплан и качество среды города. – Красноярск: Сиб. Федер. ун-т, 2014 – 124 с.
124. Econophysics and sociophysics: trends and perspectives / B.K. Chakrabarti, A. Chakraborti, A. Chatterie (eds.). Berlin, Wiley-VCH, 2006, 622 p.
125. The dynamics of complex urban systems. An interdisciplinary approach / S. Albeverio, et al. (eds.). Berlin, Springer, 2007, 504 p.
126. Аверин Г.В. О справедливости принципа соответственных состояний для систем различной природы / Г.В. Аверин, А.В. Звягинцева // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Сер. Экономика. Информатика. – 2017. – № 16(265), вып. 43. – С. 104–112.
127. Аверин Г.В. О проблеме измеримости состояний сложных систем / Г.В. Аверин, А.В. Звягинцева, А.А. Швецова // Мягкие измерения и вычисления. – 2020. – Т. 37, № 12. – С. 18–30.
128. Averin G.V., Zviagintseva A.V., Konstantinov I.S. and Shvetsova A.A. Method and Criteria for Assessing the Sustainable Development. *The Journal of Social Sciences Research*. 2018. Special Issue 1, vol. 4: 106–112.
129. Averin G.V., Zviagintseva A.V., Konstantinov I.S. and Shvetsova A.A. Measurement of the Status of Complex Systems in Multidimensional Phase Spaces. *An International Journal of Advanced Computer Technology*. 2019. Vol. 8, Issue 6: 3176–3181.
130. Швецова А.А. О комплексном измерении состояний социально-экономических объектов / А.А. Швецова, Г.В. Аверин, А.В. Звягинцева // Современная экономика: проблемы и решения. – 2021. – № 2(134). – С. 42–54.

- 131.Аверин Г.В. Комплексная оценка реального курса валют стран мира и статистические закономерности глобальной финансовой системы / Г.В. Аверин, А.В. Звягинцева, А.А. Швецова, А.А. Синько // Системный анализ и информационные технологии в науках о природе и обществе. – 2018. – № 1(14)–2(15). – С. 107–117.
- 132.Бабкина Л.Н., Скотаренко О.В. Квалиметрический подход в региональных социально-экономических исследованиях. – СПб.: МКС, 2013. – 198 с.
- 133.Мягкие вычисления и измерения: в 3 т. Т. 1. Теоретические основы и методы / под ред. С.В. Прокопчиной. – М.: Научная библиотека, 2017. – 420 с.
- 134.Прокопчина С.В. Концептуальные основы шкал измерения свойств сложных объектов / С.В. Прокопчина // Мягкие измерения и вычисления. – 2020. – № 7. – С. 5–12.
- 135.Государственная автоматизированная информационная система «Управление». Документы стратегического планирования. – Элект. рес. – URL: <https://gasu.gov.ru/stratdocuments> (25.02.25).
- 136.О стратегическом планировании в Российской Федерации (с изменениями и дополнениями): Федер. закон [от 28.06.2014, №172-ФЗ] // Электр. рес. URL: <http://base.garant.ru/70684666/> (20.09.24).
- 137.Методические рекомендации по оптимизации стратегического планирования на муниципальном уровне / А. Пузанов, Р. Попов, Д. Ланцев. – М.: Фонд «Институт экономики города», 2015. – 32 с.
- 138.Методические рекомендации по заполнению формы и к разработке показателей прогнозов социально-экономического развития субъектов Российской Федерации (форма 2П). – 416 с. – Электр. рес. URL: <https://primorsky.ru/authorities/executive-agencies/departments/economics/development/forecast.php>; [http://volgafin.volgograd.ru/upload/iblock/0ba/6\\_metod\\_rekomendatzii.pdf](http://volgafin.volgograd.ru/upload/iblock/0ba/6_metod_rekomendatzii.pdf) (25.09.24).

139. Методические рекомендации по разработке и корректировке стратегии социально-экономического развития субъекта Российской Федерации и плана мероприятий по ее реализации. Утв. Приказом Минэкономразвития России [от 23.03.17, №132]. – 24 с. – Электр. рес. URL: <https://www.economy.gov.ru/material/file/3b00b259b4cccebf36dd63177813aa7a/Prikaz132.pdf> (25.09.24).
140. Методические рекомендации к разработке показателей прогнозов социально-экономического развития субъектов Российской Федерации. – М.: Минэкономразвития РФ. 2009. – 188 с. – Электр. рес. URL: <https://uchebana5.ru/download/1011097.html> (25.09.24).
141. Методические рекомендации по составлению и исполнению бюджетов субъектов Российской Федерации и местных бюджетов на основе государственных (муниципальных) программ, Минфин России, 2014 г. – 21 с. – Электр. рес. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70660866/> (20.09.24).
142. Методические рекомендации по разработке долгосрочных планов социально-экономического развития крупных и крупнейших городских агломераций. Утв. Приказом Минэкономразвития России [от 26.09.2023, №669]. – Электр. рес. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/407660338/> (20.09.24).
143. Методические рекомендации по разработке краткосрочных прогнозов социально-экономического развития муниципальных образований / Моск. обществ. науч. фонд; ГУ ИМЭИ Минэкономразвития России. – М.: МОНФ, 2002. – 143 с. – Электр. рес. URL: [https://vasilievaa.narod.ru/mu/stat\\_rab/books/mpsf/mun42.zip](https://vasilievaa.narod.ru/mu/stat_rab/books/mpsf/mun42.zip) (25.09.24).
144. Методические рекомендации по разработке, корректировке, мониторингу среднесрочного прогноза социально-экономического развития Российской Федерации». Утв. приказом Минэкономразвития

- России [от 30.06.2016, №423]. – Электр. рес. URL: <http://docs.cntd.ru/document/420383543> (24.09.24).
145. Методические рекомендации по подготовке проектов схем территориального планирования субъектов Российской Федерации. Утв. Приказом [от 19.04.2013, №169]. – Электр. рес. URL: <http://docs.cntd.ru/document/499017648> (20.09.24).
146. Перечень показателей мониторинга процессов в реальном секторе экономики, финансово-банковской и социальной сферах субъектов Российской Федерации: распоряж. Правительства РФ от 15.06.2009, №806-р. – Электр. рес. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/6625196/> (23.09.24).
147. Методические рекомендации МЧС России по мониторингу и прогнозированию чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера. К.Д. Моськин. – М.: ФГБУ ГОЧС (ФЦ) МЧС России, 2024. – 168 с. – Электр. рес. URL: <https://sudact.ru/law/metodicheskie-rekomendatsii-mchs-rossii-po-monitoringu-i/> (20.09.24).
148. ГОСТ 17.1.4.02-90. Вода. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла а. – Изд-во стандартов. 1990. – 15 с.
149. Govindjee. Chlorophyll a Fluorescence: A Bit of Basics and History. In: Chlorophyll fluorescence: a signature of photosynthesis / ed. by Papageorgiou GC, Govindjee. Springer. The Netherlands, Dordrecht, 2004: 1–42.
150. Maxwell K. and Johnson G.N. Chlorophyll fluorescence – a practical guide. *J. Exp. Bot.* 2000. Vol. 51, no. 345: 659–668.
151. Переменная и замедленная флуоресценция хлорофилла а – теоретические основы и практическое приложение в исследовании растений / В.Н. Гольцев, М.Х. Каладжи, М.А. Кузманова, С.И. Аллахвердиев. – М.–Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2014. – 220 с.

152. Корнеев Д.Ю. Информационные возможности метода индукции флуоресценции хлорофилла. – К.: Альтерпрес, 2002. – 188 с.
153. Strasser R.J. and A. Srivastava, Govindjee. Polyphasic chlorophyll a fluorescent transient in plants and cyanobacteria. *Photochem. Photobiol.*, 1999. no. 1: 32–42.
154. Strasser R.J., Srivastava A. and Tsimilli-Michael M. The fluorescence transient as a tool to characterize and screen photosynthetic samples. *Probing Photosynthesis: Mechanism, Regulation & Adaptation*. Taylor & Francis, London, 2000: 443–480.
155. Сезонные изменения флуоресценции хлорофилла водоемов Звенигородской станции Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова / Д.Н. Маторин, Н.П. Тимофеев, Д.А. Тодоренко и др. // *Биофизика*. – 2020. – Т. 65, № 2. – С. 331–339.
156. Новиков Д.А. Статистические методы в медико-биологическом эксперименте / Д.А. Новиков, В.В. Новочадов. – Волгоград: ВолГМУ, 2005. – 84 с.
157. Сиделев С.И. Анализ связей пигментных и структурных характеристик фитопланктона высокоэвтрофного озера / С.И. Сиделев, О.В. Бабаназарова // *Журнал Сибирского Федерального Университета. Биология*. – 2008. – № 2. – С. 153–168.
158. Смольская О.С. Спектральные пигментные индексы фитопланктона в разнотипных водных объектах Беларуси / О.С. Смольская, А.А. Жукова // *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. – 2018. – № 1. – С. 113–123.
159. Станиславская Е.В. Пигментные характеристики перифитона озерно-речных систем урбанизированных территорий / Е.В. Станиславская // *Известия Самарского научного центра РАН*. – 2016. – Т. 18, № 2(2). – С. 502–506.
160. Микроводоросли Черного моря: проблемы сохранения биоразнообразия и биотехнологического использования / Под ред.

- Ю.Н. Токарева, З.З. Финенко, Н.В. Шадрина. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. – 454 с.
161. Яворская Н.М. Содержание фотосинтетических пигментов в водорослях перифитона протоки Амурской (Хабаровский край) / Н.М. Яворская // Региональные проблемы. – 2017. – Т. 20, № 1. – С. 5–10.
162. Внутрипопуляционная вариабельность параметров флуоресценции у морской планктонной водоросли *Thalassiosira weissflogii* при разной обеспеченности азотом / Е.Н. Воронова, Л.В. Ильяш, С.И. Погосян и др. // Микробиология. – 2009. – Т. 78, № 4. – С. 469–478.
163. Петросян В.С. Химия, человек и окружающая среда / В.С. Петросян, Е.А. Шувалова. – М.: ООО «Буки Веди», 2017. – 472 с.
164. Тихонов А.Н. Электронный транспорт в хлоропластах: регуляция и альтернативные пути переноса электронов / А.Н. Тихонов // Биохимия. – 2023. – Т. 88, № 10. – С. 1742–1760.
165. Матишов Г.Г. Циклический транспорт электронов вокруг фотосистем I и II в тилакоидах светло-зеленых секторов листьев пестролистных растений *Ficus benjamina* L. / Г.Г. Матишов, В.С. Лысенко, В.Г. Соьер // Доклады АН. 2010. – Т. 435, № 3. – С. 424–426.
166. Исследование состояния фотосинтетического аппарата фитопланктона Балтийского моря флуоресцентными методами / Д.Н. Маторин, С.И. Погосян, В.А. Осипов, Р. Хаптер // Вестн. моск. ун-та. Сер. Биология. – 2006. – № 1. – С. 61–66.
167. Маторин Д.Н. Флуоресценция хлорофилла высших растений и водорослей / Д.Н. Маторин, А.Б. Рубин. – М.–Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2012. – С. 22–26.
168. Ризниченко Г.Ю. Вопросы математического моделирования в биологии. Ч.1. Динамические модели первичных процессов

- фотосинтеза / Г.Ю. Ризниченко, А.Б. Рубин // Успехи современной биологии. – 2020. – Т. 140, № 4. – С. 315–332.
169. Фрумин Г.Т. Альтернативный подход к оценке качества вод трансграничных водных объектов / Г.Т. Фрумин, Ю.А. Фетисова // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2018 – № 50. – С. 177–186.
170. Еремин В.В. Роль когерентности в явлениях переноса электрона в природных биохимических наносистемах / В.В. Еремин, И.О. Глебов, В.В. Поддубный // Наносистемы: физика, химия, математика. – 2013. – Т. 4, № 1. – С. 130–138.
171. Воздействие сточных вод угольных шахт на качество воды реки Ольховая / С.В. Беспалова, С.В. Чуфицкий, С.М. Романчук, О.Н. Саакян // Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона. – 2018. – № 3–4. – С. 152–159.
172. Биомониторинг поверхностных вод в условиях антропогенной нагрузки на примере реки Кальмиус / Беспалова С.В., Чуфицкий С.В., Романчук С.М., Кривякин А.С. // Вестник Донецкого национального университета. Сер. А: Естественные науки. – 2018. – № 3–4. – С. 100–110.
173. Р 52.24.808-2014. Оценка токсичности поверхностных вод суши методом биотестирования с использованием хлорофилла а. – Росгидромет, ФГБУ «ГХИ», 2014. – 23 с.
174. Volgusheva A.A., Kukarskikh G.P., Antal T.K. et al. Effect of dibromothymoquinone on chlorophyll a fluorescence in *Chlamydomonas reinhardtii* cells incubated in complete or sulfur-depleted medium. *Biophysics*, 2008, no. 53: 378–385.
175. Багдай Т.В. Биомониторинг экологического состояния природных водоемов / Т.В. Багдай, Н.Э. Панас, Г.Л. Антоняк, О.Э. Бубис //

- Научный вестник ЛНУВМБТ имени С.З. Гжицкого. – 2016. – № 1. – С. 190–194.
- 176.Аверин Г.В. Основы темпорологии. – Донецк: ООО «НТП «Фолиант», 2024. – 310 с.
- 177.Azgaldov, Garry G. The ABC of Qualimetry: The Toolkit for measuring immeasurable / Garry G. Azgaldov, Alexander V. Kostin, Alvaro E. Padilla Omiste; interpreter Eric Azgaldov. Ridero, 2015, 167 p.
- 178.Басовский Л.Е. Управление качеством. – М.: ИНФРА-М, 2005. – 274 с.
- 179.Шапошников В.А. Квалиметрия: уч. пос. – Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2016. – 134 с. – Электр. ресурс. URL: <http://elar.rsvpu.ru/handle/123456789/20925> (27.09.24).
- 180.Борн М. Физика в жизни моего поколения. – М.: Изд-во ин. лит-ры, 1963. – 536 с.
- 181.Аверин Г.В. О континуальном подходе к модельному представлению данных / Г.В. Аверин, И.С. Константинов, А.В. Звягинцева // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2016. – № 10. – С. 47–52.
- 182.Гухман А.А. Об основаниях термодинамики. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 383 с.
- 183.Робертс Д. Теплота и термодинамика / Пер. с англ. под ред. Вукаловича М.П. – М.: Изд. технико-теор. лит-ры, 1950. – 592 с.
- 184.Пфанцагль И.Г. Теория измерений / Пер. с нем. – М.: Мир, 1976. – 165 с.
185. Кирилин В.А. Техническая термодинамика / В.А. Кирилин, В.В. Сычев, А.Е. Шейндлин. – М.: Энергия, 1974. – 448 с.
186. Швецова А.А. Информационно-аналитическая система поддержки принятия решений для стратегического планирования развития регионов и городов / А.А. Швецова, А.В. Звягинцева // Мягкие измерения и вычисления. – 2020. – Т. 36, № 11. – С. 55–66.

187. AnAge: The Animal Ageing and Longevity Database. Available at: <https://genomics.senescence.info/species/> (accessed September 28, 2024).
188. База данных Федеральной службы государственной статистики. Регионы России. Социально-экономические показатели. – Электр. рес.: офиц. сайт. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13204> (16.09.24).
189. Программа развития ООН: Развитие человеческого потенциала в регионах России в 2013 году. – Электр. рес. URL: <http://gtmarket.ru/news/2013/06/17/6014> (16.09.24).
190. База данных Федеральной службы государственной статистики. Основные социально-экономические показатели городов. – Электр. рес.: офиц. сайт. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13206> (16.09.24).
191. Protected Planet: The World Database on Protected Areas (WDPA). Available at: [www.protectedplanet.net](http://www.protectedplanet.net) (accessed September 29, 2024).
192. Стратегия развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации до 2035 года. – Электр. рес. URL: <https://strategy24.ru/rf/news/strategiya-razvitiya-stroitelnoy-otrasli-i-zhilishchnokommunalnogo-khozyaystva-rossiyskoy-federatsii-do-2035-goda> (27.09.24).
193. База данных Федеральной службы государственной статистики. Показатели муниципальных образований. – Электр. рес.: офиц. сайт. URL: [https://rosstat.gov.ru/statistics/zhilishhnye\\_usloviya](https://rosstat.gov.ru/statistics/zhilishhnye_usloviya) (25.09.24); <https://rosstat.gov.ru/munstat> (25.09.24).
194. База данных Федеральной службы государственной статистики. Жилищное хозяйство в России. Стат. сб. / Росстат. – Электр. рес.: офиц. сайт. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13234> (20.09.24).
195. Моделирование оптических параметров источников возбуждения импульсно-модулированного флуориметра / С.В. Беспалова,

- С.М. Романчук, Б.А. Готин и др. // Вестник ДонНУ. Сер. А: Естественные науки. – 2018. – № 1. – С. 69–75.
196. Разработка информационно-аналитического комплекса мониторинга состояния природно-технических систем: отчёт о НИР №20-1вв/1 (заключительный) / Донец. нац. ун-т ; рук.: С.В. Беспалова ; исполн. : С.М. Романчук [и др.]. – Донецк. 2021. –174 с. – №ГР 0221D000063.
197. Kolber Z.F., Prasil O., Falkowski P.G. Measurements of variable chlorophyll fluorescence using fast repetition rate techniques: defining methodology and experimental protocols. *Biochim. Biophys. Acta*. 1998, no. 1367: 88–106.
198. Schreiber U., Schilwila U., Bilger W. Continuous recording of photochemical and non-photochemical chlorophyll fluorescence quenching with a new type of modulation fluorimeter. *Photosynth. Res.* 1986, no. 201: 51–62.
199. Двухкомпонентный электромагнитный первичный измерительный преобразователь скорости электропроводящей жидкости / В.Е. Силенко, Е.М. Силенко, С.Е. Силенко и др. // Современные проблемы физико-математического образования: Сборник материалов VII Междунар. научно-практич. конф. – 2017. – С. 86–89.
200. Пособие по проектированию автоматизации и диспетчеризации систем водоснабжения. – М.: Союзводоканал-НИИпроект, 1985. – 42 с.
201. Масленников В. Создание автоматизированной системы диспетчерского управления водопроводной станцией / В. Масленников // Системотехника, телемеханика и автоматизация // Системная интеграция, коммунальное хозяйство. – 2002. – № 1. – С. 20–25.
202. Автоматизация водоснабжения, диспетчеризация КНС. – Электр. рес. URL: <http://www.tpproject.ru/solution/water/> (29.09.24).

203. Диспетчеризация и системы ресурсов. АСКУЭ. Энергоучет. Решения. – Электр. рес. URL: [http://www.insat.ru/projects/Dispatching\\_/](http://www.insat.ru/projects/Dispatching_/) (19.09.24).
204. Рульников А.А. Автоматизация систем водоснабжения и водоотведения / А.А. Рульников, К.Ю. Евстафьев. – М.: Изд. дом Инфра-М, 2007. – 205 с.
205. Автоматизированная система управления насосными станциями г. Гагарин. – Электр. рес. URL: <http://www.matis-m.ru/> (27.09.24).
206. Романчук С.М. Автоматизированная система мониторинга и управления водоснабжением города Донецка / С.М. Романчук // Вестник ДоУНУ. Сер.А: Естественные науки. – 2009. – № 2. – С. 133–143.
207. Романчук С.М. Направления развития городских АСУ ТП водоснабжения и водоотведения / С.М. Романчук // Наукові праці Донецького національного технічного університету – Серія: «Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка». – 2014. – №1 (19). – С. 131–141.
208. Романчук С.М. Мониторинг и анализ данных в процессе управления водоснабжением города Донецка / С.М. Романчук // Системний аналіз та інформаційні технології у науках про природу та суспільство. – 2011. – №1. – С. 133–141.
209. Романчук С.М. Алгоритмы управления технологическими режимами водоснабжения городов / С.М. Романчук // Вестник ДоНУ. – 2014. – № 1. – С. 103–109.
210. Разработка информационно-аналитической системы управления жизнеобеспечением городов и состоянием окружающей среды: отчет о НИР №17-1вв/1 (промежуточный) / Донец. нац. ун-т ; рук.: В.В. Данилов; исполн.: С.М. Романчук [и др.] – Донецк, 2017. – 169 с. – №ГР 0117D000066.
211. Разработка информационно-аналитической системы управления жизнеобеспечением городов и состоянием окружающей среды: отчет о НИР №17-1вв/1 (заключительный) / Донец. нац. ун-т ; рук.:

- В.В. Данилов ; исполн. : С.М. Романчук [и др.] – Донецк, 2018. – 184 с. – №ГР 0117D000066.
212. Разработка программно-аппаратных комплексов мониторинга состояния природных и техногенных пространственно-распределенных водных объектов: отчет о НИР №19-1вв/1 (заключительный) / Донец. нац. ун-т ; рук.: С.В. Беспалова ; исполн. : С.М. Романчук [и др.] – Донецк, 2019. – 134 с. – №ГР 0119D000020.
213. Разработка информационно-аналитического комплекса мониторинга состояния природно-технических систем: отчет о НИР №20-1вв/1 (промежуточный) / Донец. нац. ун-т ; рук.: С.В. Беспалова ; исполн. : С.М. Романчук [и др.] – Донецк, 2020.
214. ГОСТ 34.320-96. Информационные технологии. Система стандартов по базам данных. Концепции и терминология для концептуальной схемы и информационной базы. – Введ. с 01.07.2001. - М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. – 46 с.
215. РД 50-682-89. Методические указания. Информационная технология. Комплекс стандартов и руководящих документов на автоматизированные системы. Общие положения. – Введ. с 01.01.90. – М.: ИПК изд-во стандартов, 2000. – 181 с.
216. Alliance to Save Energy. Creating an Energy-Efficient World. Available at: <http://www.ase.org/> (accessed September 19, 2024).
217. Шабанов В.В. Ведение мониторинга водных объектов в современных условиях: монография / В.В. Шабанов, В.Н. Маркин. - М.: РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 2015. – 150 с.
218. Дядюн С.В. Построение организационно-технологической автоматизированной системы управления водоснабжением крупного города / С.В. Дядюн, И.М. Писаревский, О.Н. Штельма // Технологический аудит и резервы производства. – 2015. – № 6(3). – С. 9–13.

219. Cameron A.C., Trivedi P.K. Regression Analysis of Count Data. Cambridge University Press, Cambridge, 2013, 566 p.
220. Шитиков В.К. Классификация, регрессия и другие алгоритмы Data Mining с использованием R / В.К. Шитиков, С.Э. Мастицкий. – Электр. рес. URL: <https://ranalytics.github.io/data-mining/> (23.09.24).
221. Мастицкий С.Э. Статистический анализ и визуализация данных с помощью R / С.Э. Мастицкий, В.К. Шитиков. – М.: ДМК Пресс. 2015. – 496 с.
222. Bessalova S.V., Romanchuk S.M., Chufitskiy S.V., Perebeinos V.V. and Gotin B.A. Fluorimetric analysis of the impact of coal sludge pollution on phytoplankton. *Biophysics*, 2020. Vol. 65, no. 5: 850–857.
223. Дрейпер Н.Р. Прикладной регрессионный анализ. Множественная регрессия / Н. Дрейпер, Г. Смит; [пер. с англ. и ред. М. Власенко и др.]. – 3-е изд. (Серия Теория вероятностей и математическая статистика). – М.: Диалектика. – 2007. – 912 с.
224. Флах П. Машинное обучение. Наука и искусство построения алгоритмов, которые извлекают знания из данных / пер. с англ. А.А. Слинкина. – М.: ДМК Пресс. – 2015. – 400 с.
225. Шкундина Ф.Б. Интеллектуальный анализ данных мониторинга биологических очистных сооружений / Ф.Б. Шкундина, В.А. Книсс, Р.А. Шкундина, Л.А. Таминдарова // Экология и промышленность России. – 2006. – № 9. – С. 35–37.
226. Шитиков В.К. Рандомизация и бутстреп: статистический анализ в биологии и экологии с использованием R / В.К. Шитиков, Г.С. Розенберг. – Тольятти: Кассандра. – 2014. – 314 с.

## Приложение А

### Некоторые показатели и индикаторы для комплексной оценки урбанизированных территорий

№	Показатель или индикатор	Рекомендуемое значение
1	2	3
<i>1. Инфраструктура и техногенная деятельность</i>		
1.1	Площадь городской застройки, км <sup>2</sup> ; %	min
1.2	Доля городского населения от общей численности населения, %	опр. спец-ой задач
1.3	Темпы урбанизации, % годовых изменений	тоже
<i>1.1 Показатели озеленения территории промышленных городов</i>		
1.4	Площадь насаждений общего пользования в расчете на одного жителя, м <sup>2</sup> /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
<i>1.2 Показатели образования и использования отходов</i>		
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 твердых бытовых отходов, собираемых и утилизируемых на контролируемых объектах, от общего объема муниципальных отходов, образующихся в городах, %	max
1.11	Доля площади мест хранения бытовых и промышленных отходов (терриконы, свалки, полигоны), %	min
<i>1.3 Показатели промышленных и транспортных зон</i>		
1.12	Доля территорий опасных промышленных объектов I класса опасности (СЗЗ 1000 м), %	min
1.13	Доля территорий промышленных групп с предприятиями I-III класса опасности (СЗЗ ≥ 300 м), %	
1.14	Доля территорий промышленных групп с предприятиями VI-V класса опасности (от 50 м до 100 м СЗЗ), %	

Продолжение таблицы приложения А

1	2	3
1.15	Доля площади полос отвода автомобильных и железных дорог, %	тоже
1.16	Доля площади зашумленных территорий, %	-/-
<i>2. Социально-экономическая сфера</i>		
2.1	Численность населения, тыс. чел.	опр. спец-ой задач
2.2	Плотность населения, чел./км <sup>2</sup>	тоже
2.3	Городская территория, км <sup>2</sup>	—
2.4	Валовый внутренний продукт на душу населения, млрд руб. (\$)	max
2.5	Вклад секторов (промышленность, услуги, сельское хозяйство) в валовую добавленную стоимость, %	опр. спец-ой задач
2.6	Экспорт товаров, млрд руб. (\$)	тоже
2.7	Импорт товаров, млрд руб. (\$)	-/-
2.8	Инвестиции, млрд руб. (\$)	-/-
2.9	Среднемесячная зарплата, руб. (\$)	—
2.10	Средний размер назначенных пенсий, руб. (\$)	> 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 <sup>2</sup> /чел.	соц-ные нормы
<i>3. Здравоохранение и здоровье населения</i>		
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	Материнская смертность, число умерших на 100 тыс. рожениц	min
3.7	Детская смертность (в возрасте от 1 до 4 лет), число умерших на тыс. родившихся живыми детей	тоже
3.8	Заболеваемость респираторными инфекциями в возрасте до 5 лет, число случаев на 100 тыс. детей	-/-

Продолжение таблицы приложения А

1	2	3
3.9	Заболеваемость кишечными инфекциями в возрасте до 5 лет, число случаев на 100 тыс. детей	min
3.10	Общая заболеваемость, чел. на тыс. населения	тоже
3.11	Заболеваемость туберкулезом, число случаев на 100 тыс. чел.	-/-
3.12	Коэффициент смертности от инфекционных и паразитарных болезней, на 100 тыс. чел.	-/-
3.13	Коэффициент смертности от сердечно-сосудистых заболеваний, на 100 тыс. чел.	-/-
3.14	Коэффициент смертности от новообразований, на 100 тыс. чел.	-/-
3.15	Коэффициент смертности от болезней системы кровообращения, на 100 тыс. чел.	-/-
3.16	Коэффициент смертности от болезней органов дыхания, на 100 тыс. чел.	-/-
3.17	Коэффициент смертности от болезней органов пищеварения, на 100 тыс. чел.	-/-
3.18	Уровень обеспеченности врачами, врачей на тыс. чел.	40 – 60
3.19	Расходы на здравоохранение, % ВВП	7 – 11
<i>4. Образование</i>		
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
<i>5. Жилищно-коммунальное хозяйство</i>		
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, %	менее 2
5.4	Потери воды, млн. м <sup>3</sup> ; %	min

Продолжение таблицы приложения А

1	2	3
<i>6. Производство и потребление</i>		
6.1	Объем отгруженных товаров собственного производства, выполненных работ и услуг собственными силами, млрд руб. (\$)	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.	-/-
<i>7. Промышленность и энергетика</i>		
7.1	Общее потребление энергии (в тоннах нефтяного эквивалента на душу населения), т.н.э./чел.	опр. спец-ой задач
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 <sup>3</sup> ; %	-/-
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
<i>8. Транспорт</i>		
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
<i>9. Сельское хозяйство</i>		
9.1	Сельскохозяйственные земли, % от общей площади земли	опр. спец-ой задач

Продолжение таблицы приложения А

1	2	3
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 менее 30
9.5	Использование пестицидов на гектар сельскохозяйственных земель, кг/га	регламентируемые нормы
9.6	Орошаемые земли, % от общей площади сельскохозяйственных земель	опр. спец-ой задач
9.7	Гибель посевов, % от общей площади	менее 5
<i>10. Безопасность граждан</i>		
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, на 100 тыс. чел.	-/-
10.5	Количество беженцев, мигрантов и лиц, перемещенных в результате стихийных бедствий и конфликтов, на 100 тыс. чел.	показатели ЦМВП и СС
<i>11. Качество атмосферного воздуха</i>		
11.1	Общий объем выбросов на единицу ВВП, тыс.т/млрд руб. (\$)	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	Удельные выбросы вредных веществ, кг/чел.; тонн/км <sup>2</sup>	min
11.5	Уровень загрязнения атмосферного воздуха основными поллютантами (диоксидом азота, пылью, диоксидом серы, оксидом углерода, формальдегидом, бенз(а)пиреном), доли ПДК <sub>с.с.</sub>	не более 1

Продолжение таблицы приложения А

1	2	3
<i>12. Водопользование и качество вод</i>		
12.1	Доля площади водных пространств в общей территории региона (города), %	—
12.2	Показатели загрязнения водных объектов (БПК <sub>5</sub> , фосфаты, нитраты, соли аммония)	экологические нормативы
12.3	Забор воды из природных источников, млн м <sup>3</sup> ; % по отношению к запасам пресных вод	min
12.4	Использование свежей пресной воды на одного жителя в день, л	Нормативы
12.5	Процент населения, имеющего доступ к улучшенным источникам воды, %	100
12.6	Повторное и оборотное использование пресной воды, млн м <sup>3</sup>	экономически эффективное
12.7	Сброс сточных вод по категориям загрязнения в поверхностные водные объекты, млн м <sup>3</sup>	min
12.8	Безвозвратное изъятие объема поверхностного стока, %	не более 20
<i>13. Природа и биоразнообразие</i>		
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
<i>14 Качество ландшафтов и почв</i>		
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 <sup>2</sup>	-/-
14.5	Доля земель, подлежащих реабилитации, %	экономически эффективное

Продолжение таблицы приложения А

1	2	3
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
<i>15. Изменения климата</i>		
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 <sub>2</sub> -экв./чел.), в том числе:	тоже
15.3	- выбросы диоксида углерода (CO <sub>2</sub> );	-/-
15.4	- выбросы метана (CH <sub>4</sub> );	-/-
15.5	- выбросы закиси азота (N <sub>2</sub> O)	-/-
15.6	Выбросы парниковых газов от энергетических отраслей, тонн CO <sub>2</sub> -экв./чел., %	-/-
15.7	Выбросы парниковых газов от транспорта, тонн CO <sub>2</sub> -экв./чел., %	-/-
15.8	Выбросы парниковых газов от промышленных процессов, тонн CO <sub>2</sub> -экв./чел., %	-/-
15.9	Выбросы парниковых газов от сельского хозяйства, тонн CO <sub>2</sub> -экв./чел., %	-/-
<i>16. Риск опасных явлений и бедствий</i>		
16.1	Количество опасных событий в год (по видам опасности), ед.	междунар., нац. порог. значен.
16.2	Доля опасных событий со смертельным исходом в год (по видам опасности), %	min
16.3	Доля населения, проживающего в районах, подверженных опасности, %	min
16.4	Доля населения, живущего ниже национальной черты бедности, %	показатели ЦУР и СС
16.5	Количество бедствий (по типу опасности), объявленных правительством в год, ед.	—

Продолжение таблицы приложения А

1	2	3
16.6	Количество смертей, связанных с бедствиями, на 100 тыс. чел.	показатели ЦУР и SF
16.7	Число пропавших без вести в результате стихийных бедствий, на 100 тыс. чел.	показатели ЦУР и SF
16.8	Число раненых или больных в результате стихийных бедствий, на 100 тыс. чел.	показатели SF
16.9	Доля площади лесов, пострадавшая от лесных пожаров, %	min, глобал. показатели CC
16.10	Прямые сельскохозяйственные потери в результате бедствий, млрд руб. (\$)	SF и глобал. показатели CC
<i>17. Планирование и управление городами (цели в области устойчивого развития)</i>		
17.1	Доля городского населения, проживающего в трущобах, неформальных поселениях или в неудовлетворительных жилищных условиях, %	min
17.2	Соотношение темпов потребления земли к темпам роста населения	1
17.3	Средняя доля застроенной территории городов, которая является открытым пространством общественного пользования для всех, %	опр. спец-ой задач
17.4	Общие расходы на душу населения на сохранение культурного и природного наследия, руб. (\$)	опр. спец-ой задач
<i>18. Показатели пространственной урбанизации в городах</i>		
18.1	Площадь застройки на душу населения, м <sup>2</sup> /чел.	опр. спец-ой задач
18.2	Изменение общей застроенной площади, к предыдущему периоду, %	опр. спец-ой задач
18.3	Скорость потребления земли, за заданный период времени, %	min
18.4	Темп прироста населения, за заданный период времени, %	опр. спец-ой задач

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  $\geq 20 \text{ м}^2/\text{чел.}$ );  
 междунар., нац. порог. значен. – рекомендуемые на международном уровне пороговые значения, а также национальные пороговые значения;  
 ЦУР – глобальная система показателей для целей устойчивого развития;  
 СС – глобальный набор статистических данных и показателей, связанных с изменением климата;  
 ЦУР и СС: <https://unstats.un.org/sdgs/metadata/> и <https://unstats.un.org/unsd/envstats/climatechange.cshhtml>;  
 Коэффициент демографической нагрузки пожилыми людьми – отношение числа пожилых людей в возрасте, когда они, как правило, экономически неактивны (65 лет и старше), к числу людей трудоспособного возраста (15–64 лет).  
 SF – показатели Сендайской рамочной программы по снижению риска бедствий: <https://www.undrr.org/publication/technical-guidance-monitoring-andreporting-progress-achieving-globaltargets-sendai>;  
 ЦМВП – Центр мониторинга внутренних перемещений: <https://www.internaldisplacement.org/database/methodology>

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

### Макрос и пользовательские функции на VBA, реализующие алгоритм выбора эталонного процесса при описании процессов развития объектов

**'#Language "WWB-COM"**  
**Option Base 1**

#### **Sub Main**

```
'Основные переменные
'my_cases = количество регионов
'my_features = количество показателей
'my_tables = количество годов (таблиц)
Const my_cases As Integer = 3
Const my_features As Integer = 3
Const my_tables As Integer = 3

'С какой строки и какого столбца считывать данные
Const first_case As Integer = 0
Const first_feature As Integer = 1

'Пустые массивы, которые в будущем заполняются формулами
Dim z(1 To my_tables, 1 To my_cases, 1 To my_features) As Double
Dim t(1 To my_tables, 1 To my_cases) As Double
Dim z_new(1 To my_tables, 1 To my_cases, 1 To my_features) As Double
Dim sigma_i(1 To my_tables, 1 To my_cases) As Double
Dim sigma(1 To my_cases) As Double

'Считывание данных
Dim my_spreadsheet As Spreadsheet 'Создание новой переменной-таблицы
i = 1
For Each my_spreadsheet In Application.Spreadsheets 'Проход по всем
открытым таблицам (объект Application - открытое приложение Statistica)
    For l = 1 To my_cases
        For j = 1 To my_features
            z(i, l, j) = my_spreadsheet.Cells(1+first_case,
j+first_feature) '
        Next
    Next
    i += 1
Next

'вычисление результатов по формулам
```

```

For l = 1 To my_cases
    For i = 1 To my_tables
        t(i, l) = (z(i, l, 1) - z(1, l, 1))/(z(my_tables, l, 1) - z(1, l, 1))
        sigma_i(i, l) = 0
        For j = 1 To my_features
            z_new(i, l, j) = t(i, l) * (z(my_tables, l, j) - z(1, l, j)) + z(1, l,
j)
            sigma_i(i, l) = sigma_i(i, l) + (z(i, l, j) - z_new(i, l, j)) *
(z(i, l, j) - z_new(i, l, j))
        Next
        sigma_i(i, l) = sigma_i(i, l)/(my_features-1)
    Next
    sigma(l) = 0
    For i = 2 To my_tables-1
        sigma(l) += sigma_i(i, l)
    Next
    sigma(l) = sigma(l)/(my_tables-2)
Next

'Запись данных в новые таблицы
For i = 1 To my_tables
    Dim NewSS As New Spreadsheet 'Создание нового объекта-таблицы
    Set NewSS = New Spreadsheet 'Обнуление нового объекта-таблицы
после предыдущей итерации
    NewSS.SetSize(my_cases, my_features+1) 'Установление размера
таблицы
    NewSS.Activate 'Активация таблицы (чтобы работать именно с ней,
как будто бы нажали на неё мышкой, чтобы она всплыла поверх остальных
таблиц)
    For l = 1 To my_cases
        For j = 1 To my_features
            NewSS.Cells(l, j) = z_new(i, l, j) 'Запись значения в
ячейку
        Next
        NewSS.Cells(l, my_features+1) = sigma_i(i, l) 'Запись значения
в ячейку
    Next
Next

'сортировка sigma
Dim ind_mas(1 To my_cases) As Integer
For l = 1 To my_cases
    ind_mas(l) = 1
Next

Dim my_max As Double

```

```

Dim ind As Integer
For l= 1 To my_cases
    my_max = sigma(l)
    ind = 1
    For k = 1 To my_cases
        If my_max < sigma(k) Then
            my_max = sigma(k)
            ind = k
        End If
    Next
    sigma(ind) = sigma(l)
    ind_tmp = ind_mas(ind)
    ind_mas(ind) = ind_mas(l)
    sigma(l) = my_max
    ind_mas(l) = ind_tmp
Next

'Запись sigma в новую таблицу
Dim NewSS2 As New Spreadsheet 'Новая переменная-таблица
NewSS2.SetSize(my_cases, 2) 'Установка размера таблицы
NewSS2.Activate 'Активация таблицы
For l = 1 To my_cases
    NewSS2.Cells(l, 1) = sigma(l) 'Запись значения
    NewSS2.Cells(l, 2) = ind_mas(l) 'Запись значения
Next

End Sub

```

Научное издание

*Беспалова С.В., Звягинцева А.В.,  
Романчук С.М., Чуфицкий С.В.*

**Комплексные измерения при мониторинге  
урбанизированных территорий  
и городских агломераций**

Монография

Издание 2-е, переработанное и дополненное

Издательство ДонГУ

Дизайн обложки В.В. Щербинин

Типография «ИП Шрамко А.В.»

283004, Донецк, пр-т Дзержинского, 69-Б.

Тел.: (949) 389-72-73.

E-mail: [tarcus88@gmail.com](mailto:tarcus88@gmail.com)

Подписано в печать 20.02.2025.

Формат 60х90/16. Усл. печ. листов 20,35.

Заказ №8836. Тираж 1000 экз.

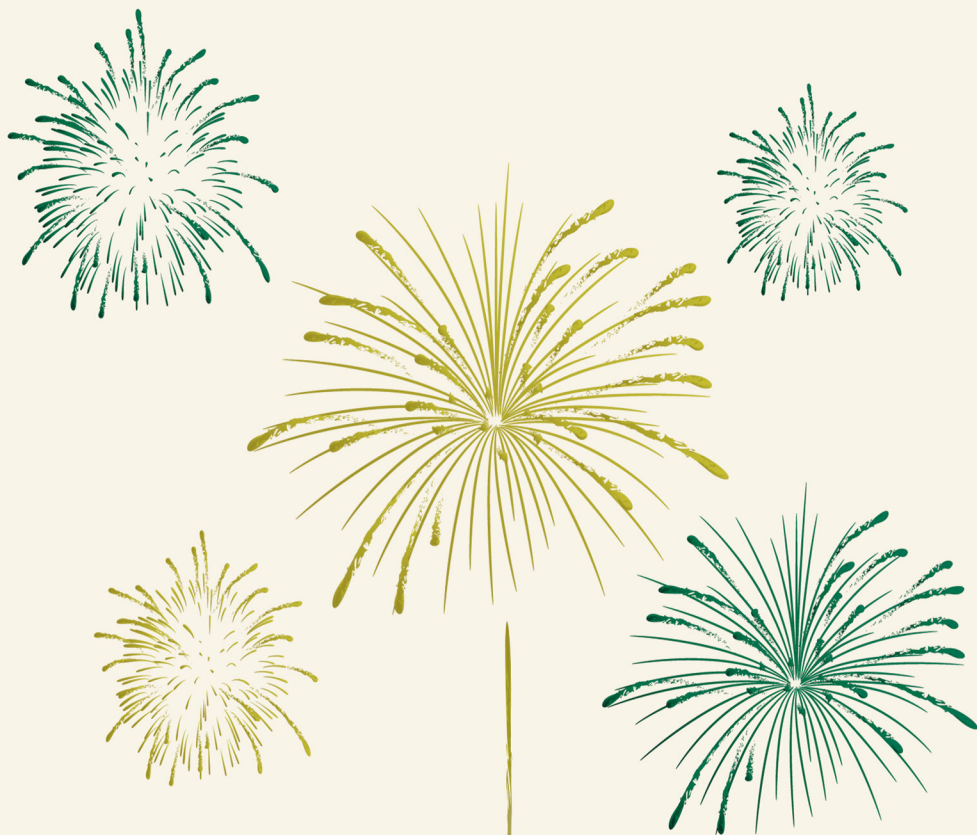
ISBN 978-5-00262-007-4

ISBN 978-5-00262-007-4





КТО ИЗМЕРЯЕТ МИР,  
ТОТ ЕГО И ПОНИМАЕТ



ДОНЕЦК - ДОНБАСС