

Российский фонд фундаментальных исследований
Федеральный исследовательский центр
Южный научный центр Российской академии наук



Научные основы мониторинга
и прогнозирования опасных явлений
в зоне стратегических объектов
в акватории российских морей

Ростов-на-Дону
Издательство ЮНЦ РАН
2022

УДК 551.5:504.4(262.54+268.45)

НЗ4



*Издание осуществлено при финансовой поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований
по проекту № 21-15-00044, не подлежит продаже*

Рецензенты:

д-р геогр. наук *С.В. Бердников*, канд. биол. наук *О.В. Степаньян*

Ответственный редактор

академик *Г.Г. Матишов*

Авторский коллектив:

академик *Г.Г. Матишов* (введение, гл. 1, 2),
канд. биол. наук *Н.И. Булышева* (гл. 4, 5, заключение),
д-р биол. наук *Г.М. Воскобойников* (гл. 6), д-р техн. наук *Г.В. Горелова* (гл. 4),
д-р геогр. наук *Ю.И. Инжебейкин* (гл. 2), д-р биол. наук *М.В. Макаров* (гл. 6),
д-р физ.-мат. наук *А.Л. Чикин* (гл. 3), д-р техн. наук *Э.В. Мельник* (гл. 4),
д-р физ.-мат. наук *Л.Г. Чикина* (гл. 3), канд. геогр. наук *В.В. Польшин* (гл. 1),
канд. биол. наук *В.В. Титов* (введение, гл. 1, библиогр.),
канд. геогр. наук *А.В. Клещенко* (гл. 3), канд. биол. наук *К.В. Кренева* (гл. 5),
канд. техн. наук *Д.В. Орда-Жигулина* (гл. 4),
канд. техн. наук *М.В. Орда-Жигулина* (гл. 4), канд. биол. наук *С.В. Малавенда* (гл. 6),
канд. биол. наук *Д.В. Пуговкин* (гл. 6), канд. биол. наук *И.В. Рыжик* (гл. 6),
Г.Ю. Глущенко (гл. 5), канд. хим. наук *Л.О. Метелькова* (гл. 6), *Д.О. Салахов* (гл. 6)

НЗ4 Научные основы мониторинга и прогнозирования опасных явлений в зоне стратегических объектов в акватории российских морей: [монография] / Г.Г. Матишов, Н.И. Булышева, Г.М. Воскобойников и др.; [отв. ред. акад. Г.Г. Матишов]. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2022. – 236 с. – ISBN 978-5-4358-0223-8.

Коллективная монография содержит результаты исследований современного состояния акватории и береговой линии Азовского, Баренцева и других морей европейской части России. Рассмотрены основные гидрологические процессы, периодически приводящие к образованию опасных явлений природного характера и наносящие ущерб населению и береговой инфраструктуре. Представлены разработки по мониторингу, прогнозу и минимизации последствий ряда негативных явлений.

Издание предназначено для экологов, географов, биологов, специалистов инженерных и спасательных служб.

УДК 551.5:504.4(262.54+268.45)

Утверждено на заседании Ученого совета ЮНЦ РАН № 2 от 23 апреля 2021 г.

ISBN 978-5-4358-0223-8

© ЮНЦ РАН, 2022

Russian Foundation for Basic Research
Federal Research Center The Southern Scientific Center
of the Russian Academy of Sciences



Scientific basis for monitoring
and forecasting hazardous phenomena
in the zone of strategic facilities
in the water area of the Russian seas

Rostov-on-Don
SSC RAS Publishers
2022

UDC 551.5:504.4(262.54+268.45)
M39



*The publication was carried out with the financial support
of the Russian Foundation for Basic Research under the project
No. 21-15-00044, not for sale*

Reviewers:

Dr. (Geography) S.V. Berdnikov, PhD O.V. Stepanyan

Editor-in-Chief

Academician RAS G.G. Matishov

Team of Authors:

academician G.G. Matishov (introduction, ch. 1, 2),
PhD N.I. Bulysheva (ch. 4, 5, conclusion),
Dr (Biology) G.M. Voskoboinikov (ch. 6), Dr (Technical Sciences) G.V. Gorelova (ch. 4),
Dr (Geography) Yu.I. Inzhebeikin (ch. 2), Dr (Biology) M.V. Makarov (ch. 6),
Dr (Physics and Mathematics) A.L. Chikin (ch. 3), Dr (Technical Sciences) E.V. Melnik (ch. 4),
Dr (Physics and Mathematics) L.G. Chikina (ch. 3), PhD V.V. Pol'shin (ch. 1),
PhD V.V. Titov (introduction, ch. 1, bibliogr.),
PhD A.V. Kleschenkov (ch. 3), PhD K.V. Kreneva (ch. 5),
PhD D.V. Orda-Zhigulina (ch. 4), PhD M.V. Orda-Zhigulina (ch. 4), PhD S.V. Malavenda (ch. 6),
PhD D.V. Pugovkin (ch. 6), PhD I.V. Ryzhik (ch. 6),
G.Yu. Glushchenko (ch. 5), PhD L.O. Metel'kova (ch. 6), D.O. Salakhov (ch. 6)

**Matishov, G.G. (Editor-in-Chief) (2021). Scientific basis for monitoring and
M39 forecasting hazardous phenomena in the zone of strategic facilities in the water area
of the Russian seas: [monograph] / G.G. Matishov, N.I. Bulysheva, G.M. Voskoboinikov
et al. Rostov-on-Don: SSC RAS Publishers, 2022. 236 p. (in Russian)**

ISBN 978-5-4358-0223-8

The collective monograph contains the results of studies of the current state of the water area and coastline of the Sea of Azov, Barents and other seas of the European part of Russia. The main hydrological processes that periodically lead to the formation of natural hazards and damage the safety of the population and coastal infrastructure are considered. The developments on monitoring, forecasting and minimizing the consequences of a number of negative phenomena are presented.

The publication is intended for ecologists, geographers, biologists, engineering and rescue services.

UDC 551.5:504.4(262.54+268.45)

Approved at Meeting No. 2 of the Academic Council of SSC RAS of 23 April 2021.

ISBN 978-5-4358-0223-8

© SSC RAS (2022)

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	9
Глава 1. ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ АЗОВСКОГО МОРЯ	15
1.1. Физико-географическая характеристика Азовского моря	15
1.2. Характеристика рельефа дна Азовского моря	17
1.3. Характеристика береговой зоны Азовского моря	24
1.4. Голоценовая история развития Азовского моря	29
1.5. Характеристика донных отложений Азовского моря	31
1.6. Содержание органического вещества в донных отложениях Азовского моря	38
1.7. Изменение условий осадконакопления в бассейне Азовского моря под влиянием природных и антропогенных факторов	41
Глава 2. СЕЙШИ В ПОЛУЗАМКНУТЫХ МОРЯХ КОНТИНЕНТАЛЬНОГО ШЕЛЬФА	49
2.1. Азовское море	58
2.2. Белое море	71
2.3. Сейши как фактор устойчивого функционирования экосистемы Азовского моря	74
Глава 3. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОНИКНОВЕНИЯ СОЛЕННЫХ ВОД ИЗ ТАГАНРОГСКОГО ЗАЛИВА В УСТЬЕ ДОНА	78
3.1. Математическая модель распределения солености в Таганрогском заливе	80
3.2. Математическая модель поступления соленой воды в дельту Дона	84
3.3. Численное исследование пространственного распределения соленых вод в Таганрогском заливе	90
3.4. Численное исследование поступления соленых вод в дельту Дона	94
Глава 4. МЕТОДЫ РЕАЛИЗАЦИИ КОМПОНЕНТОВ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОПАСНЫХ ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ НА БАЗЕ ТЕХНОЛОГИЙ ЦИФРОВОЙ ЭКОНОМИКИ ПРИ АНАЛИЗЕ ГИДРОЭКОСИСТЕМ	101
4.1. Модуль когнитивного анализа как компонент подсистемы поддержки принятия решений для мониторинга и прогнозирования опасных природных процессов	110
4.2. Мониторинг сообщений пользователей в социальных сетях	112

4.3. Методика организации мониторинга опасных явлений эстуарных зон юга России на основе анализа современного состояния популяций макрозообентоса	119
4.4. Прототип модуля когнитивного анализа	120
4.4.1. Разработка когнитивной модели верхнего уровня	124
4.4.2. Разработка двухуровневой когнитивной модели IG12 верхнего и среднего уровней	129
4.4.3. Разработка когнитивной карты третьего уровня IG3	136
4.4.4. Описание программного модуля преобразования данных мониторинга природных явлений в прибрежных зонах в формат когнитивной имитационной модели экосистемы	143
4.4.5. Пример мониторинга и прогнозирования опасных природных процессов на основе анализа состояния сообществ зообентоса под действием антропогенных и климатических факторов, в том числе экстремальных условий окружающей среды	147
Глава 5. ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СООБЩЕСТВ ОБРАСТАНИЯ В ДЕЛЬТЕ ДОНА	154
5.1. Формирование сообществ микроводорослей на экспериментальных пластинах	157
5.2. Сообщества микрозоопланктона на экспериментальных пластинах	161
5.3. Формирование сообществ макрообрастаний на экспериментальных пластинах	165
Глава 6. ВОДОРОСЛИ-МАКРОФИТЫ БАРЕНЦЕВА МОРЯ В ОЧИСТКЕ ОТ НЕФТЕПРОДУКТОВ ПРИБРЕЖНЫХ АКВАТОРИЙ: ОТ ТЕОРИИ К ПРАКТИКЕ	179
6.1. Поглощение и преобразование дизельного топлива водорослью <i>Palmaria palmata</i> (Linnaeus) F. Weber & D. Mohr, 1805 (Rhodophyta) и ее возможная роль в биоремедиации морской воды	180
6.2. Использование ферментов антиоксидантной системы для оценки физиологического состояния водорослей-макрофитов в условиях загрязнения нефтепродуктами	188
6.3. Количественные характеристики эпифитных бактериальных сообществ водорослей <i>Fucus vesiculosus</i>	196
6.4. Роль водорослей-макрофитов в биоремедиации прибрежных акваторий арктических морей от нефтепродуктов на примере Кольского залива Баренцева моря	204
Заключение	214
Литература	217

TABLE OF CONTENTS

Introduction	9
Chapter 1. GEOLOGICAL AND HYDROGEOLOGICAL FEATURES OF THE SEA OF AZOV	15
1.1. Physical and geographical characteristics of the Sea of Azov	15
1.2. Characteristics of the relief of the bottom of the Sea of Azov	17
1.3. Characteristics of the coastal zone of the Sea of Azov	24
1.4. Holocene history development of the Sea of Azov	29
1.5. Characteristics of bottom sediments of the Sea of Azov	31
1.6. Content of organic matter in bottom sediments of the Sea of Azov	38
1.7. Changes in sedimentation conditions in the Azov Sea basin under the influence of natural and anthropogenic factors	41
Chapter 2. SEICHES IN THE SEMI-ENCLOSED SEAS OF THE CONTINENTAL SHELF	49
2.1. Sea of Azov	58
2.2. White Sea	71
2.3. Seiches as a factor of sustainable functioning of the Sea of Azov ecosystem	74
Chapter 3. NUMERICAL MODELING OF THE PROCESS OF SALINE WATER PENETRATION FROM THE TAGANROG BAY INTO THE DON RIVER OUTLET	78
3.1. Mathematical model of salinity distribution in the Taganrog Bay	80
3.2. Mathematical model of salt water inflow into the Don delta	84
3.3. Numerical study of the spatial distribution of saline waters in the Taganrog Bay	90
3.4. Numerical study of the inflow of salt water into the Don delta	94
Chapter 4. METHODS FOR THE IMPLEMENTATION OF COMPONENTS OF SYSTEMS FOR MONITORING AND FORECASTING OF DANGEROUS NATURAL PHENOMENA BASED ON DIGITAL ECONOMY TECHNOLOGIES IN THE ANALYSIS OF HYDROECOSYSTEMS	101
4.1. Cognitive analysis module as a component of the decision support subsystem for monitoring and forecasting hazardous natural processes	110
4.2. Tool for monitoring messages of users in social networks	112

4.3. Methods for organizing monitoring of dangerous phenomena in estuarine zones in southern Russia based on an analysis of the current state of macrozoobenthos populations	119
4.4. Prototype Cognitive Analysis Module	120
4.4.1. Developing an upper-level cognitive model	124
4.4.2. Developing a two-level cognitive model IG12 of the upper and middle levels	129
4.4.3. Developing a cognitive map of the third level IG3	136
4.4.4. The description of the software module for converting of monitoring data of natural phenomena in coastal zones into the format of a cognitive imitating ecosystem's model.	143
4.4.5. An example of monitoring and forecasting dangerous natural phenomena based on the analysis of the state of zoobenthos communities under the influence of anthropogenic and climatic factors, including extreme environmental conditions	147
Chapter 5. FEATURES OF THE FORMATION OF FOULING COMMUNITIES IN THE DON RIVER DELTA	154
5.1. Formation of microalgae communities on experimental plates	157
5.2. Communities of microzooplankton on experimental plates	161
5.3. Formation of macrofouling communities on experimental plates	165
Chapter 6. ALGAE-MACROPHYTES OF THE BARENTS SEA IN THE PURIFICATION OF COASTAL WATERS FROM OIL PRODUCTS: FROM THEORY TO PRACTICE	179
6.1. The absorption and transformation of diesel fuel by the alga <i>Palmaria palmata</i> (Linnaeus) F. Weber & D. Mohr, 1805 (Rhodophyta) and its possible role in the bioremediation of seawater	180
6.2. The use of enzymes of the antioxidant system to assess the physiological state of macrophyte algae in conditions of oil pollution	188
6.3. Quantitative characteristics of epiphytic bacterial communities of algae <i>Fucus vesiculosus</i>	196
6.4. The role of macrophyte algae in the bioremediation of coastal areas of the Arctic seas from oil products on the example of the Kola Bay of the Barents Sea	204
Conclusion	214
References	217

В соответствии с Климатической доктриной Российской Федерации, утвержденной распоряжением Президента Российской Федерации от 17 декабря 2009 г. № 861-рп, разработка и реализация оперативных и долгосрочных мер по адаптации России к изменениям климата являются одними из основных задач политики в области климата. Одной из задач планирования мер адаптации представляется «научное обеспечение процесса разработки и принятия органами государственной власти и хозяйствующими субъектами решений, направленных на повышение уровня безопасности (защищенности жизненно важных интересов личности, общества и государства) от последствий изменений климата для населения и экономики, включая опасные природные явления и чрезвычайные ситуации природного характера».

С 2000 года в мире произошло более десяти тысяч стихийных бедствий. Ежедневно от наводнений, землетрясений, цунами, пожаров и других природных катастроф страдает более 650 тысяч человек. Каждый час природных катастроф наносит экономический ущерб около шестнадцати миллионов долларов [Самые страшные стихийные бедствия XXI века]. На сайте Всемирной метеорологической организации (The World Meteorological Organization (WMO)) отмечают, что изменчивость климата и экстремальные погодные явления – одна из основных причин серьезных кризисов. Так, среди 33 стран, затронутых продовольственным кризисом в 2018 году, в 26 странах колебания климата и экстремальные погодные условия являются дополнительными факторами наряду с экономическими потрясениями и конфликтами [Всемирная метеорологическая организация].

Особое внимание необходимо уделять изучению экстремальных природных ситуаций в прибрежных зонах, т.к. катастрофы на этих территориях приносят большие человеческие и материальные потери. В последние годы прибрежные районы стали рассматриваться как единый природный объект, состоящий из многих компонентов и подверженный

многообразным экстремальным природным явлениям, которые являются источником рисков для человеческой деятельности. В зарождении катастрофических экстремальных явлений в прибрежных районах оценивается роль Мирового океана с двух аспектов: прямых локальных воздействий (ветровые волны, штормовые нагоны, разрушение берегов) и удаленных косвенных воздействий, связанных с влиянием океана на сушу. Несмотря на существенный прогресс в развитии прибрежных наблюдательных сетей, ощущается недостаток натурных данных, необходимых для прогноза экстремальных явлений. Народному хозяйству и ВМФ необходимо опираться на достоверные и надежные прогнозы и иметь возможность составлять экономические и военно-стратегические планы на перспективу. Возникновение природных опасных явлений и экстремальных событий в прибрежной зоне требует комплексных усилий и использования самых современных моделей для оценки природных рисков и катастроф. Хотелось бы отметить, что с начала XXI в. ни одно стихийное бедствие, даже для небольшого Азово-Черноморского бассейна, не было предсказано:

- 1) аварийный разлив нефтепродуктов в Керченском проливе 11 ноября 2007 г. Потерпели крушение 13 судов, часть из них села на мель, три судна с грузом серы затонули, танкер «Волгонефть-139» разломился на две части; в акватории залива вылился мазут по крайней мере из двух танков объемом 1000–1200 т [Матишов и др., 2008а, б];
- 2) затопление десятиметровой волной г. Крымска на р. Адагум в июле 2012 г. [Матишов, Клещенко, 2012];
- 3) катастрофические наводнения в Таганрогском заливе и дельте Дона 23–24 марта 2013 г. и 24 сентября 2014 г., когда ураганная адвекция черноморских вод в мелководный азовский водоем привела к поступлению морской воды соленостью до 4–6 ‰ в водопровод г. Азова. Эти катаклизмы обусловлены экстремальной активностью черноморских циклонов. Все они сопровождались ураганными юго-западными и южными ветрами, достигавшими скорости 38 м/с;
- 4) резкое снижение уровня воды в устьевой области и дельте реки Дон при экстремальных восточных ветрах, вызывающее опасное для судоходства снижение уровня воды. Так, в октябре 2015 и 2016 гг. из-за обмеления Азово-Донского морского канала караваны по 50–70 судов ждали возможности выйти в Азовское море до 2–3 недель;
- 5) проблемы питьевого водоснабжения в Южном макрорегионе, вызванные «цветением» воды и экстремальной адвекцией соленых вод

в дельту Дона. С 2015 г. в условиях недостаточной водности р. Дон появился дополнительный фактор ухудшения качества воды – неприятный запах, напоминающий запах дуста;

- 6) экстремальные ледовые явления в Азовском море. Мелководность и, следовательно, небольшой теплозапас Азовского моря определяют достаточно резкие колебания ледовых условий на море в течение зимы. Зима 2005/2006 гг. была одной из самых экстремальных за последние 50 лет. Толщина льда достигала 0,5 м, наблюдалось явление торосения, при этом высота торосов составляла 1,5–2,5 м. К сравнительно суровым по температурам относились зимы 2007/2008 и 2011/2012 гг. [Матишов и др., 2017];
- 7) экстремальный сгон в реке Дон и Азовском море 15–26 ноября 2019 г. Впервые за 20 лет вода в Азовском море отступила на 100 м от береговой линии. Падение уровня реки Дон на некоторых участках превышало 2 м. Температура воздуха в эти дни опустилась до -11°C . Отмечена массовая гибель гидробионтов в сообществах прибрежной зоны.

Помимо природных опасных явлений, всё острее становится проблема загрязнения акваторий всех внутренних морей России поллютантами, поступающими с речным стоком, загрязнения бытовыми отходами прибрежной зоны и пляжей. Опасное воздействие на морские и пресноводные экосистемы оказывают разведка и разработка месторождений нефти и газа, а также биологические инвазии, в том числе и в форме интродукции. Любые виды намеренного вселения в долгосрочной перспективе всегда наносят вред аборигенной фауне.

В условиях постоянно возрастающего антропогенного воздействия на окружающую среду, увеличения масштабов и частоты опасных природных и техногенных процессов исследованию проблем безопасности придается особое значение. Приоритетными научными направлениями являются идентификация и оценка природной и техногенной опасности; совершенствование систем мониторинга, прогнозирования и оценки риска возникновения чрезвычайных ситуаций; развитие теоретических и практических основ управления безопасностью; разработка комплекса мероприятий по обеспечению прогноза и минимизации последствий. В ситуации происходящих климатических изменений особенно востребованы научно-исследовательские работы, направленные на своевременное выявление деструктивных природных процессов, и популяризация полученных результатов.

Для Азовского моря, расположенного в зоне высокой рекреационной нагрузки, характерна значительная пространственная неоднородность солености. На участке от дельты Дона до Керченского пролива соленость возрастает от 0,5–0,7 ‰ до 13–14 ‰. Но самый резкий градиент солености – до 10 ‰ – формируется в Таганрогском заливе. Здесь происходит сложное взаимодействие донских речных и трансформированных морских вод. Сокращение стока р. Дон наряду с интенсивной циклонической деятельностью и аномальной адвекцией черноморских вод привело к тому, что в течение 2014–2016 гг. в Таганрогском заливе фиксировалась высокая соленость (до 12 ‰). Экстремальные сгоны и нагоны воды на взморье, наблюдающиеся в последние годы, приводят как к обмелению русла Дона, так и к осолонению Таганрогского залива. В то же время под воздействием стока Дона в Таганрогском заливе формируется опресненная водная масса. Для устьевой области Дона характерно сложное сочетание пресных, слабосоленоватых и солоноватых вод. Установлено, что в устьевой области даже во время сгонов фиксируется значительное повышение солености (до 5 ‰).

Еще одним природным фактором, способствующим ухудшению функционирования водных сооружений и плавсредств, является коррозия материалов. Процессы коррозии необратимы, в связи с чем их необходимо выявлять на ранних стадиях, давать количественную оценку коррозионного повреждения, прогнозировать опасность развития в случае отсутствия мер по антикоррозионной защите. В водной среде обрастание, коррозия, старение и биоповреждения материалов и конструкций могут затруднять их эксплуатацию вплоть до полной ее невозможности [Карпов и др., 2007]. Коррозия материалов тесно связана с обрастанием, зачастую многократно увеличивающим ее скорость и степень повреждения судов и портовых сооружений. Потери от коррозии и обрастания по некоторым данным превышают десятки миллиардов долларов США в год [Протасов, 2001].

Среди всех типов обрастания наибольшим видовым разнообразием и возможностью образовывать значительную биомассу характеризуется прибрежное обрастание, исследование которого наиболее важно. Именно в прибрежных районах Мирового океана сосредоточена основная часть субстратов антропогенного происхождения. Особый интерес для исследования представляют устьевые области рек, в пределах которых, как правило, наблюдаются наибольшие диапазоны и градиенты изменения абиотических факторов (климатических, гидрологических,

гидрохимических и др.). В условиях эксплуатации изношенного парка судов класса река – море и с учетом перспектив строительства новых портовых сооружений в Приазовье актуальной задачей науки является исследование биообрастания металлов в зоне смешения речных и морских вод в широком диапазоне гидроклиматических условий.

В настоящее время остро встает вопрос разработки научно-методологических и методических основ и воплощение теоретических принципов мониторинга для водных экосистем, которые бы включали как классические, натурные наблюдения, так и новые технологии бесконтактного мониторинга. Авторами монографии были разработаны структура системы мониторинга и прогнозирования опасных природных процессов, а также структура подсистемы поддержки принятия решений в части создания прототипа модуля когнитивного анализа. Была разработана модель когнитивного моделирования на основе анализа современного состояния популяций макрозообентоса Азовского моря для разработки системы мониторинга и прогнозирования опасных природных процессов в части автоматизированной помощи принятия решений.

В модели реализована интеграция различных видов мониторинга, выявлены неочевидные связи между ними. Формирование библиотеки данных для экспертов производится с помощью аппарата когнитивного анализа. Когнитивные карты позволяют оценить совокупное влияние и значимость различных данных о состоянии гидроэкосистемы для того, чтобы подтвердить факт присутствия глубинных изменений в экосистеме и учесть эти изменения при имитационном моделировании опасных природных процессов. Основным преимуществом разработанной модели является возможность одновременного анализа большого потока слабоструктурированных данных, поступающих из различных источников. Обработка и хранение данных в когнитивном модуле реализованы децентрализованно с применением таких технологий, как «туманные» и «облачные» вычисления, блокчейн, беспроводные технологии связи и интернет вещей.

Проведенные исследования были осуществлены в ходе реализации ряда проектов, поддержанных РФФИ в рамках Программы «Опасные явления»: № 18-05-80010 «Исследование и прогноз опасных гидрометеорологических и геолого-геоморфологических процессов в районах функционирования стратегических объектов на Азово-Черноморском побережье (исторические и современные аспекты)», № 18-05-80022 «Реконструкция и изменение палеоландшафтов в эпоху голоцена под влия-

нием природных и антропогенных процессов на примере акватории Таганрогского залива и прилегающего участка дельты Дона», № 18-05-80092 «Разработка научных основ создания средств систем мониторинга и прогнозирования опасных процессов и обеспечения безопасности населения и береговой инфраструктуры на базе технологий цифровой экономики», № 18-05-80058 «Новые технологии биоремедиации и роль фитоценозов в очистке прибрежных акваторий арктических морей при чрезвычайных ситуациях, связанных с хранением и транспортировкой углеводородов».

1.1. Физико-географическая характеристика Азовского моря

Азовское море относится к бассейнам внутриплатформенных впадин, для которых характерны выравненность и однообразие рельефа дна с незначительными уклонами поверхности [Страхов, 1962]. Наибольшая длина моря (от косы Арабатская Стрелка до устья р. Дон) – 360 км, наибольшая ширина (между вершинами Темрюкского и Белосарайского заливов) – 180 км. Площадь морской акватории составляет 39,1 тыс. км² при объеме водной толщи в 29 км³. Максимальная глубина – около 14 м при средней глубине в 7,4 м [Гидрометеорология ... 1991]. Практически со всех сторон Азовское море окружено сушей. Только на юге оно соединяется с Чёрным морем через Керченский пролив, длина которого составляет 48 км (рис. 1.1). Граница между этими морями проходит по линии м. Такиль – м. Панагия.

Континентальная часть бассейна Азовского моря занимает территорию в 556 тыс. км², которая преимущественно располагается в зоне недостаточного и неустойчивого увлажнения с дефицитом влаги. Расчетное значение увлажнения достигает 400 мм [Мировой водный баланс ... 1974]. Главными гидрографическими элементами водосборного бассейна являются р. Дон, бассейн которого охватывает пространство к северу от Азовского моря, и Кубань, берущая свое начало на Главном Кавказском хребте. Территория водосбора ограничена водоразделами, проходящими по Приазовской и Среднерусской возвышенностям, Донецкому кряжу – на западе; водораздельному пространству между притоками Оки и Дона – на севере; по южной части Приволжской возвышенности, Ергеням и Ставропольской возвышенности – на востоке; по Большому Кавказу, Таманскому, Керченскому полуостровам и Крымским горам – на юге [Шнюков и др., 1974].



Рис. 1.1. Контуры и гидрологическая речная сеть бассейна Азовского моря

Территория, расположенная севернее Азовского моря, находится в пределах Причерноморской и Окско-Донской низменностей с абсолютными отметками, не превышающими 200 м, и возвышенностей – Приазовской, Донецким кряжем, Среднерусской, Приволжской и Ергенями – с абсолютными отметками от 200 до 400 м. Кроме южных склонов Приазовской возвышенности эта территория дренируется р. Дон, длина которой составляет 1950 км, а площадь водосбора – 422 тыс. км².

Приазовская возвышенность дренируется небольшими реками, впадающими в море с севера, из которых самыми значительными являются реки Молочная и Кальмиус. Общая площадь водосбора малых степных рек Северного и Северо-Восточного Приазовья, впадающих в Азовское море, составляет 76 тыс. км². По Восточно-Азовской низменности протекают реки Ея и Бейсуг, впадающие соответственно в Ейский и Бейсугский лиманы. В Крымских горах берет свое начало река Салгир, почти полностью пересыхающая при приближении к заливу Сиваш.

Река Кубань со своими притоками дренирует северо-западные склоны Большого Кавказа и Ставропольской возвышенности. Ее длина составляет 906 км, а площадь водосбора – 58 тыс. км² [Шнюков и др., 1974; Бронфман и др., 1979; Бронфман, Хлебников, 1985].

Самым большим заливом Азовского моря, глубоко вдающимся в сушу на северо-востоке, является Таганрогский залив, площадь которого составляет 13, 6 % от площади всего моря. Длина залива в широтном направлении составляет 140 км, а его ширина возрастает с востока на запад от 26 до 52 км. От основной акватории моря с южного берега он отделяется косой Долгой, простирающейся с юго-востока на северо-запад, а с северного берега – Белосарайской косой, дистальное окончание которой направлено на юго-запад, с небольшим отклонением к западу. На востоке Таганрогский залив граничит с дельтой р. Дон.

В прибрежной зоне Азовского моря большие площади занимают мелководные водоемы – лагуны и лиманы, которые имеют ограниченную связь с морским водоемом и, как правило, отделяются от него аккумулятивными формами рельефа – пересыпями. Для всех этих водоемов характерны незначительные глубины, редко превышающие 2 метра, и переменный химический состав водной толщи, формирующийся за счет климатических факторов и речного стока.

Основная часть лиманов сосредоточена на площади дельты Кубани или северо-восточнее нее. Самыми крупными из них в этом районе являются Ахтанизовский, Ахтарский, Бейсугский, Ейский лиманы и оз. Ханское. На северном побережье водоемы лиманного типа развиты не так широко и самыми крупными из них являются Молочный и Утлюкский лиманы. На западе море образует водоем лагунного типа – Сиваш, который от остального моря отделяется крупной аккумулятивной формой – Арабатской стрелкой. С Азовским морем Сиваш соединяется нешироким и неглубоким Геническим (Тонким) проливом. Площадь Сиваша составляет 2540 км², а общая площадь водоемов лиманного типа приблизительно равна 4200 км² [Шнюков и др., 1974].

1.2. Характеристика рельефа дна Азовского моря

Азовское море представляет собой мелководный бассейн с глубинами, не превышающими 14 метров (рис. 1.2).

Наиболее мелководной является северная часть моря, в пределах которой широкое развитие получили аккумулятивные формы со своими подводными продолжениями, разделяемые системой заливов. Самыми крупными из них являются Белосарайский, Бердянский, Обиточный заливы и Утлюкский лиман. Чередование аккумулятивных форм и депрессий в этой части моря способствовали образованию сильной изрезанности

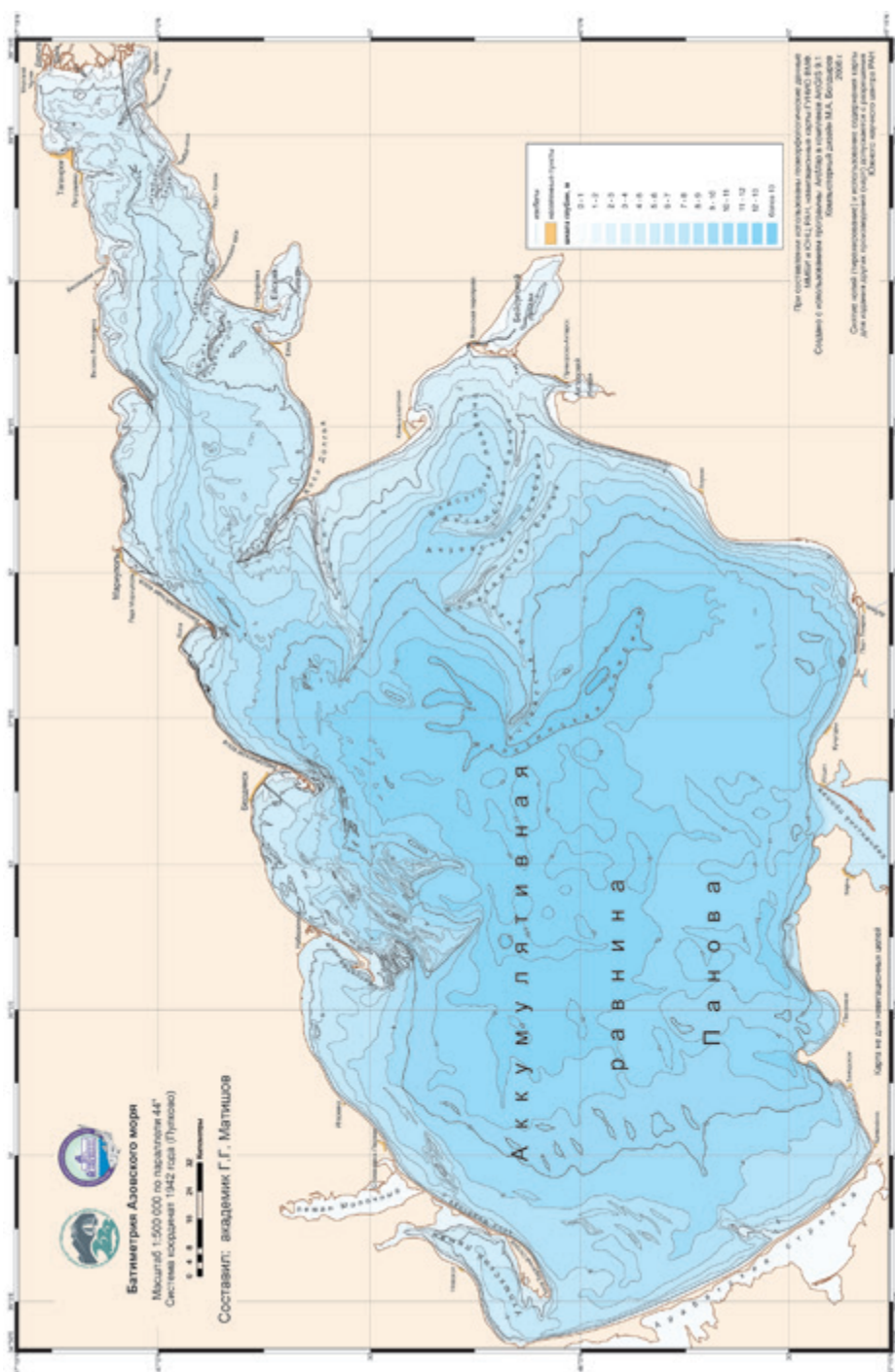


Рис. 1.2. Батиметрическая карта Азовского моря [Матишов, 2006а]

береговой линии. Изобата, ограничивающая глубины в 5 м, располагается на расстоянии от 0,5 до 10 км (в среднем 2 км) от берега, приближаясь к нему в районах заливов и удаляясь на площадях развития аккумулятивных форм. Изобата, оконтуривающая 10-метровую глубину, удалена вглубь моря от северного берега на 30–40 км.

Площадь заливов и длина разделяющих их кос увеличивается с востока на запад. Наиболее крупными косами в этой части Азовского моря являются Бирючья (коса Федотова – Бирючий Остров), Обиточная, Бердянская, Белосарайская, Кривая, Долгая и Беглицкая. Это так называемые косы азовского типа, выделенные В.П. Зенковичем [1958, 1962]. Все вышеуказанные косы, кроме Беглицкой, имеют северо-восточное простирание.

С восточной стороны этих кос (кроме Беглицкой) преобладает размыв пород дна с образованием абразионных террас (бенчей), которые протягиваются в море до глубины 6 метров. С западных бортов кос происходит аккумуляция песчано-ракушечного и глинисто-алевритового материала [Мамыкина, Хрусталева, 1980].

От песчаных кос (коса Федотова, Обиточная, Бердянская) к центру моря, до глубин 10 м, развиваются многочисленные песчаные валы и гряды. Некоторые из них имеют протяженность от 10 до 12 км, а относительную высоту – от 2 до 6 м. К центру моря (с северо-запада на юго-восток) размер гряд уменьшается. Все косы и подводные гряды имеют волновой генезис и большая часть их сложена перемещенными створками раковин моллюсков и их обломками [Зенкович, 1962; Артюхин, Алексеев, 1989; Мамыкина, Хрусталева, 1980; Хрусталева, Ивлиева, 1999; Ивлиева, 2005; Матишов, 2007а, б].

От Обиточной косы в сторону моря наблюдается до десяти субпараллельных форм рельефа, также имеющих волновую природу образования. Высота некоторых гряд в этом районе по отношению к днищам соседних ложбин может достигать 4–6 м.

Большую часть юго-восточной акватории Азовского моря занимают Темрюкский и Ясенский заливы, разделенные системой аккумулятивных форм (Железинская и Ахтарская банки). В Темрюкский залив двумя рукавами – Протокой и Петрушина – впадает река Кубань. От Ясенского залива двумя врезами в область прилегающей суши отходят Бейсугский и Ахтарский лиманы. Устьевая часть Бейсугского лимана от Азовского моря практически полностью перегорожена пересыпью с узкой протокой.

Подводный склон в Темрюкском заливе до глубины 9–10 м имеет более приглубый характер, чем на противоположном северном берегу моря (с углом наклона дна, достигающим 0,050 м). Во многих местах

в этом районе пятиметровая изобата, огибая аккумулятивные формы дна, проходит от берега на расстоянии первых сотен метров. К центру моря с глубин 9–10 м угол наклона поверхности дна становится менее пологим. В этом месте в рельефе дна отмечается террасовидный выступ.

Для южной части акватории Азовского моря, ограниченной с юга Керченским и Таманским полуостровами, характерны единичные вулканические постройки, образованные деятельностью грязевых вулканов и осложняющие рельеф дна. Как правило, эти постройки в большей степени сложены глинистыми осадками и подвержены интенсивному размыву волнами [Шнюков и др., 1974].

Северо-восточнее Темрюкского залива в рельефе дна с запада на восток оконтуриваются Ачуевская, Железинская, Ахтарская и Еленина банки. Длина этих банок достигает 35–50 км. Минимальные глубины над вершинами банок 3–7 м, а над банкой Еленина – до 1–2 м. Высота гряд по отношению к днищам соседних ложбин варьируется от 2 до 5 м. Железинская и Ахтарская банки, возможно, в прошлом имели морфологическую связь с участком близлежащего берега, которая впоследствии была прервана [Артюхин, Алексеев, 1989].

Между собой Железинская и Ахтарская банки разделены узкой полого-склонной Ачуевской ложбиной с глубинами дна 8–10 м. С запада Ачуевская и Железинская гряды обрамлены замкнутым понижением дна с глубинами 13–13,5 м – Железинской ложбиной. Протяженность Железинской ложбины составляет 80 км, а ее ширина – 4–12 км [Матишов, 2006а, б]. В западной части моря расположены банки Морские и Арабатская. Эти положительные формы рельефа возвышаются над соседними участками дна на 3–5 м.

В северо-восточной части моря простирается далеко вдающийся в сушу мелководный и распресненный Таганрогский залив. По своей сути этот залив является эстуарным водоемом, площадь акватории которого была расширена интенсивным процессом абразии, протекавшим на общем фоне трансгрессивного поднятия уровня моря в позднем голоцене [Панов, Хрусталева, 1966; Матишов, 2007а; Матишов и др., 2019]. Значительное влияние на все процессы, происходящие в Таганрогском заливе, оказывает р. Дон, которая впадает в него с северо-востока.

Рельеф восточной части Таганрогского залива представляет собой пологоволнистую равнину со средними глубинами от 2 до 3 м. Она плавно переходит в аванделту Дона, для которой характерны многочисленные подводные русла. Все они связаны с речными долинами дельты и имеют относительную глубину порядка 1–2 м.

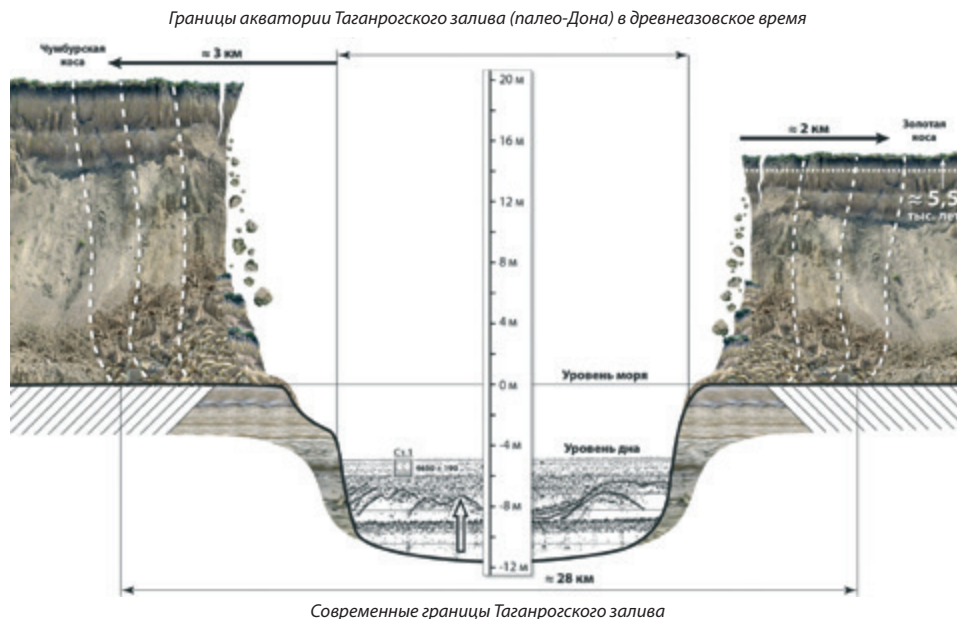


Рис. 1.3. Реконструкция развития акватории Таганрогского залива по данным сейсмоакустического профилирования дна и исследований береговой зоны

Средняя глубина в Таганрогском заливе составляет около 5 м. С удалением от дельты Дона (с востока на запад) глубины постепенно увеличиваются и на выходе из него на отдельных участках дна могут достигать 9–10 м. При этом области наибольших глубин приурочены к центральной части акватории залива и достигают своего максимума на выходе из него. Наиболее мелководные участки Таганрогского залива расположены в северной его части, которая характеризуется сильной изрезанностью береговой линии, обусловленной развитием большого количества кос, разделенных глубоко вдающимися в сушу заливами.

В современном рельефе дна залива выделяется узкая ложбина, соответствующая палеодолине Дона и практически совпадающая с его осью (рис. 1.4). Данная ложбина протягивается вдоль всего залива на 150 км до аккумулятивной равнины, расположенной в центре моря. Глубина дна в ложбине увеличивается с востока на запад от 5 до 9 м.

Помимо островов, периодически образующихся в южной части моря в результате вулканических извержений, на акватории Азовского моря существуют группа островов, образованных вследствие различных литодинамических процессов, таких, например, как аккумуляция и перераспределение наносов и размыв аккумулятивных форм. Как правило, такие

острова незначительно возвышаются над уровнем моря и при сильных нагонах полностью покрываются водой.

До 1929 года самым крупным островом считался Бирючий, расположенный у северного побережья в западной части моря. Соединившись с косой Федотова, он образовал восточный берег Утлюкского лимана. Небольшие острова расположены вдоль западных берегов Бердянской и Обиточной кос. В акватории Таганрогского залива, в 7 км от г. Мариуполя, расположен остров Ляпина, а напротив входа в Ейский лиман лежит группа Песчаных островов, ограниченных с севера ложбиной подводного продолжения р. Дон. Из искусственных островов самым крупным является остров Черепаха, находящийся в 2 км южнее входа в порт г. Таганрог и насыпанный по приказу Петра I [Яновский, 2001].

Проведенный анализ батиметрических данных свидетельствует об определенной дифференцируемости и неоднородности в строении рельефа, что дает возможность выделить в пределах акватории моря участки дна с различным строением.

Среди площадных структур, занимающих большую часть поверхности морского дна, можно выделить абразионные (абразионно-аккумулятивные) террасы и аккумулятивную равнину, расположенную в центре Азовского моря [Матишов, 2006а, 2007а] (рис. 1.4).

Абразионно-аккумулятивные равнины простираются вдоль берегов, сложенных глинами и лёссовидными суглинками, и протягиваются от уреза воды до глубины 10 м в Азовском море и до глубины 8 м – в Таганрогском заливе. Особенностью прибрежных абразионно-аккумулятивных равнин является большая расчлененность по сравнению с другими районами и чередование участков размыва дна и районов аккумуляции (подводных продолжений кос, валов, гряд). Эти площади дна характеризуются интенсивной гидродинамической активностью и незначительной мощностью новоазовских отложений, которая, как правило, не превышает 3 м и увеличивается от берегов к центру моря. На многих участках равнин современные осадки не образуются.

Средние уклоны дна абразионной части равнины составляют 0,003–0,007 ‰, в южной части моря – до 0,001–0,050 ‰. Характерно постепенное увеличение глубин, нарушаемое поднятиями дна в виде ракушечных банок. С нарастанием глубин углы поверхности дна выполаживаются до 0,0003 ‰. С увеличением глубин основным рельефообразующим процессом в пределах абразионно-аккумулятивных равнин становится аккумуляция терригенного и биогенного материала [Мамыкина, 1977].

Гидродинамические условия в границах абразионно-аккумулятивных равнин способствуют интенсивному размыву дна с образованием абразионных террас (бенчей), выработанных в коренных лёссовидных суглинках и глинах. В Таганрогском заливе бенч простирается до глубины от 2 до 3 м; в открытом море – до 4–6 м.

Центральную область моря занимает обширная аккумулятивная равнина, охватывающая 45 % площади всего моря. В структурном плане она приурочена к зоне Индоло-Кубанского прогиба, испытывающего интенсивное погружение в позднечетвертичное время. Здесь зафиксированы наибольшая мощность новоазовских отложений (более 7 м) и максимальная скорость погружения поверхности морского дна (более 3 мм/год) [Панов, Хрусталева, 1966; Шнюков и др., 1974]. Глубины в пределах равнины изменяются от 10 до 13 м и более. Уклоны дна минимальны для Азовского моря и составляют менее 0,0001 ‰.

Малозаметный уклон поверхности дна аккумулятивной равнины обращен к Железинской ложбине и другим понижениям в рельефе дна, находящимся на глубинах 13–13,5 м. В северной части равнины изобатой 10 м оконтуриваются пологие поднятия дна. В центральной части равнины выделяется до 15 пологих, изометричных в плане поднятий, расположенных на глубине менее 12 м. Их размеры варьируются от 5 до 20 км, а высота составляет около 0,5 м. Благодаря однородному строению рельефа и характеру морских течений, в гидродинамическом отношении этот район наименее активен.

Морфология равнины осложняется системой древних долин палеорек, самой крупной из которых является долина палео-Дона. Очертания этих долин в рельефе дна сглажены за счет перекрывающей их толщи морских отложений, образовавшихся в древнеазовскую и новоазовскую стадию развития моря.

1.3. Характеристика береговой зоны Азовского моря

Мелководность и неравномерное, «асимметричное» распределение глубин в пределах Азовского моря, частые смены трансгрессивно-регрессивных циклов в его истории развития, гидродинамические условия, характер тектонических движений и литологический состав пород береговой зоны, предопределили различия береговых процессов и общую конфигурацию берега. Береговая зона Азовского моря отличается исключительно высокой активностью протекающих в ее пределах лито-

динамических процессов. Особенностью современной динамики берегов является преобладание абразии и локальный характер аккумуляции. Участки берега, сложенные толщей пород неоген-четвертичного возраста, чередуются с выдвинутыми далеко в море аккумулятивными формами рельефа различного происхождения (косами, пересыпями и барами), которые сложены песчано-ракушечным материалом.

Размыву подвержены не только коренные участки берега, но и аккумулятивные формы. В результате более 70 % береговой зоны разрушается, а осадочный материал, образующийся в результате этого процесса, является основным источником терригенного вещества, поступающего в акваторию Азовского моря [Мамыкина, Хрусталеv, 1980; Хрусталеv, 1989].

Аккумулятивный тип берега северного побережья представлен многочисленными косами так называемого азовского типа, пляжами и пересыпями лиманов [Зенкович, 1958; 1962]. Протяженность кос и объемы поступающего на них осадочного материала увеличиваются с востока на запад.

На участках северного побережья, сложенных лёссовидными суглинками, широкое распространение получили абразионный и абразионно-оползневой типы берега. Выходящие здесь на поверхность породы неогенового возраста способствуют широкому образованию оползней в береговой зоне (рис. 1.5).



Рис. 1.5. Участок северного побережья Таганрогского залива (западнее г. Таганрог), подверженный разрушению (фото В.В. Польшина, 2013)

По данным мониторинга экзогенных геологических процессов (ЭГП), проводимого ОАО «Южгеология» на территории Ростовской области с 1982 г., скорость отступления северного берега Таганрогского залива достигает 1–1,5 м/год. Помимо абразии для северного побережья Таганрогского залива Азовского моря также характерно активное проявление оползневых и обвально-оползневых процессов, влияющих на устойчивость береговых склонов (рис. 1.6).

На абразионное разрушение оползневых и обвально-оползневых участков северного побережья Таганрогского залива оказывают большое влияние нагонные подъемы уровня моря в периоды сильных юго-западных и западных ветров, наблюдающихся в основном в весенне-летний период. При этом в пределах широких пляжей (до 30 м и более) береговые обрывы длительное время (до 5–6 лет и более) находятся в стабильном состоянии, а нагонные подтопления способствуют перемыву осыпей, не вызывая значительного разрушения самих стенок клифов [Зеленщиков и др., 2009].

На участках северного побережья, сложенных лёссовидными суглинками и расположенных западнее Таганрогского залива, также широкое распространение получили абразионный и абразионно-оползневой типы берега. Максимальное развитие данные типы берега имели в береговой зоне Белосарайского и Бердянского заливов. В береговой полосе, расположенной западнее этих заливов, в основном получил распространение абразионно-обвальный тип берега. Выходящие здесь на поверхность породы неогенового возраста способствуют широкому образованию оползней в береговой зоне, которые в этом районе образуют одну-две террасы шириной до 50 м. Параллельно-ступенчатые оползни северного берега Таганрогского залива формируют несколько террас общей шириной до 200 м при высоте стенок срыва 10–20 м.

Косы северного побережья имеют сравнительно несложное внутреннее строение. В плане поля развития прибрежных отложений представляют собой треугольник, прислоненный основанием к уступу коренного берега, выработанного ранее абразией. Данные отложения выклиниваются в сторону моря, замещаясь более тонкими алевритово-глинистыми отложениями. В сторону суши они переходят в континентальные породы, обнажающиеся в границах береговой зоны. Залегают прибрежные отложения на осадках различного генезиса. Обращенная к берегу часть залегают на континентальных породах, а часть, обращенная к морю, подстилается морскими алевро-пелитовыми осадками [Зенкович, 1958, 1962; Хрусталева, Щербаков, 1974].

Ширина пляжей в Белосарайском заливе достигает 15–25 м, постепенно уменьшаясь к западу северного побережья до 7–15 м. Сокращение мощности пляжевых отложений связывается с погружением пород неогенового возраста в западном направлении, ведущем к дефициту пляжеобразующего материала [Мамыкина, 1977]. Пересыпи лиманов северного побережья имеют пляжи полного профиля шириной 50–100 м. В вещественном составе их отложений преобладает ракушечный материал.

На западном берегу моря прослеживается крупная аккумулятивная форма – Арабатская стрелка, которая протягивается с севера на юг на 110 км. Ширина Арабатской стрелки изменяется от 0,3 до 5 км, а высота самого крупного берегового вала достигает 4 м над уровнем моря. В вещественном составе валов преобладает ракушечный материал.

С юга море ограничивают разделенные Керченским проливом Керченский и Таманский полуострова. Строение рельефа в этой полосе берега обусловлено складчатым залеганием пород, выходящих на дневную поверхность. Антиклинали, выраженные в рельефе возвышенностями, образуют мысы в береговой зоне. На пониженных участках развиты заливы и лиманы. В западной части полуострова высота абразионно-обвального берега достигает 15–20 м, понижаясь к востоку до 5–10 м.

Полоса берега, протянувшаяся на 150 км от Пересыпского гирла Ахтанизовского лимана до Ачуевской косы, представляет собой аккумулятивный берег, сложенный наносами реки Кубань.

Строение кубанской дельты характеризуется наличием большого количества ериков, прирусловых валов и озер, которые отделяются от моря береговым баром морского края высотой от 0,5 до 1,5 м. На всем протяжении бар сложен ракушечным материалом. На участках впадения двух основных рукавов дельты – Кубани и Протоки – бар прерывается конусами выноса речного аллювия. Также для дельтовой области характерно наличие большого количества лиманов, которые по генезису и морфологии относятся к группе дельтовых озер или лагун [Мамыкина, Хрусталева, 1980].

Юго-восточное побережье сложено преимущественно лёссовидными суглинками и характеризуется повсеместным распространением абразионного типа берега. Аккумулятивный тип берега прослеживается локально. Высота береговых обрывов в основном составляет 7–11 м, а максимальная – 14–18 м (у г. Ейск).

На южном берегу Таганрогского залива максимальное развитие получили участки абразионного берега, чередующиеся с аккумулятивными

формами. Аккумулятивный тип берега представлен здесь Ейской, Глафиrowsкой, Сазальницкой, Чумбурской и Очаковской косами, которые образованы береговыми валами, последовательно причлененными к коренному берегу. Косы имеют незначительную высоту над уровнем моря (обычно 1–1,5 м), и лишь отдельные их участки достигают отметок 2–2,5 м. Длина подводных отмелей кос варьируется от 5 до 20 км.

С северо-востока в Таганрогский залив многорукавной дельтой впадает р. Дон. Дельта представляет собой удлинённый треугольник неправильной формы, расчленённый многочисленными рукавами, протоками и ериками общей площадью 340 км² [Самохин, 1958].

Таким образом, на большей части береговой зоны Азовского моря развит абразионный тип берега. Участки аккумуляции осадочного материала развиты локально и в основном представлены косами и пляжами. На юге и востоке моря аккумуляция обломочного материала происходит в виде речных наносов, формирующих крупные дельты рек Кубани и Дона. На западе участок берега представлен крупной аккумулятивной формой – Арабатской стрелкой, которая отделяет акваторию Азовского моря от оз. Сиваш.

1.4. Голоценовая история развития Азовского моря

История развития Азовского моря тесно связана с геологическим прошлым Крыма и Кавказа. Неоднократно за свое существование оно являлось связующим водоемом между Чёрным морем на западе и Каспийским на востоке. Их общее длительное развитие в пределах единого морского бассейна, чередование трансгрессивно-регрессивных этапов способствовало многочисленным биологическим инвазиям и частым сменам гидрологических и гидрохимических условий. В голоценовое время произошло обособление морских бассейнов в рамках современных границ, а ограниченная связь с Мировым океаном предопределили для каждого водоема свою историю развития [Свиточ, Янина, 2001; Янина, 2005; Матишов и др., 2019].

Ритмичный характер строения осадочной толщи Азовского моря, сформировавшейся в голоцене, свидетельствует, что накопление донных отложений происходило на фоне неоднократного изменения уровня моря [Фёдоров, 1973; 1978; Хрусталеv, Щербаков, 1974; Балабанов, Измайлов, 1988; Мысливец, 2004; Матишов 2007а, б]. Неоднократные изменения уровня моря нашли свое отражение в строении осадочной толщи голоценового возраста.

Наступление моря приводило к перекрытию речных осадков морскими, его отступление – к размыву донных отложений и накоплению аллювия.

Анализ данных показывает, что развитие азовской акватории в голоцене следует рассматривать как процесс постепенного повышения уровня моря со времени последней ледниковой эпохи, который прерывался относительно кратковременными регрессивными периодами. Если в конце плейстоцена площадь современной акватории Азовского моря представляла собой участок низменной суши, по которой протекал палео-Дон, то в начале голоценовой эпохи наметилась тенденция к проникновению черноморских вод на ее территорию. Повышение уровня моря в это время объясняется прорывом более соленых средиземноморских вод через Босфорский пролив в Чёрное море с последующей их миграцией в азовский бассейн [Матишов и др., 2019; Матишов, Польшин, 2019] (рис. 1.7).

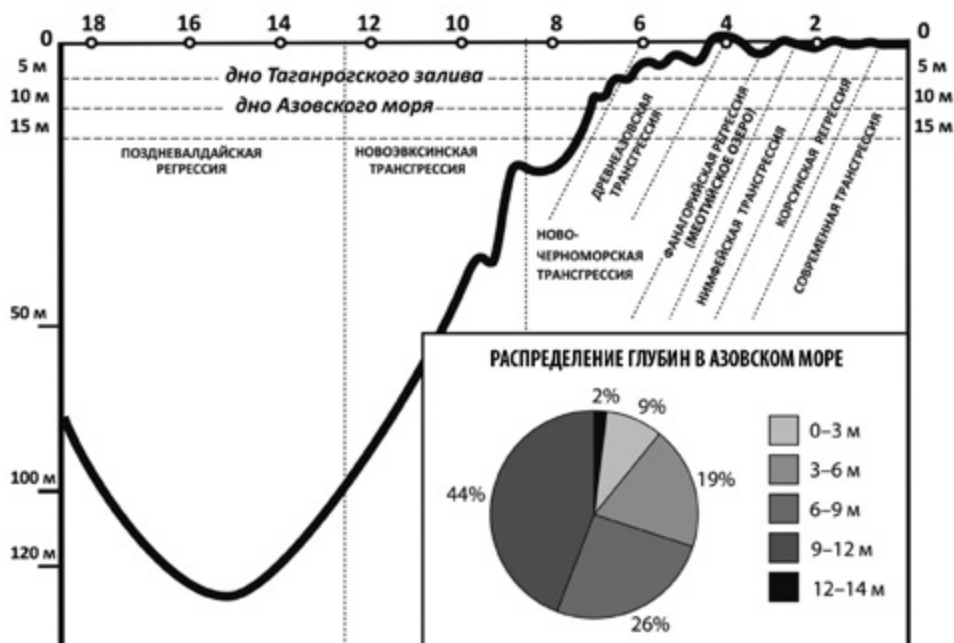


Рис. 1.7. Развитие голоценовой трансгрессии в бассейне Азовского моря

Низменные участки суши были постепенно затоплены наступающим морем и на их площади стали накапливаться глинистые и алевроитово-глинистые илы. В юго-восточной, западной и северной частях акватории отлагались прибрежно-морские осадки, представленные в основном ракушей и раковинным детритом с подчиненным количеством илистого

материала. В акватории Таганрогского залива отлагались илистые осадки, которые восточнее замещались алевритами. В центральной части залива накапливались пески, являющиеся продуктами деятельности палео-Дона [Шнюков и др., 1974].

Максимальные подъемы уровня Азовского моря в голоцене отмечались в хроноинтервалах от 7 до 4 тыс. л. н. и от 2 до 1 тыс. л. н. Эти этапы соответствуют древнеазовской (новочерноморской) и новоазовской (нимфейской) трансгрессиям, которые разделяются кратковременным периодом уровня спада, соотносящегося со временем проявления фанаторийской регрессии [Шнюков и др., 1974; Попов, 1983; Балабанов, Измайлов, 1988; Матишов, Польшин, 2019].

По всей видимости, наиболее сильно проявилась древнеазовская (новочерноморская) трансгрессия, по времени совпадающая с климатическим оптимумом голоцена. В это время на востоке море доходило до устья Маныча, а на юго-востоке древние береговые валы, фиксирующие положение береговой линии на это время, вскрыты скважинами в районе современной дельты р. Кубань на расстоянии около 40 км от современного берега [Балабанов, Измайлов, 1988; Беркович, Тимофеева, 2007; Иванов и др., 2013].

1.5. Характеристика донных отложений Азовского моря

Для понимания происходящих в регионе изменений природных условий, в целях долгосрочного планирования развития прибрежных территорий, изучение осадочного покрова дна Азовского моря и геологических разрезов на его побережье является крайне важным. Это объясняется тем, что процесс осадкообразования напрямую зависит от существующих природных условий, и любые изменения климата, речного стока, уровня моря, гидролого-гидрохимических параметров водоема, условий обитания морских организмов в той или иной степени находят свое отражение в характере строения и составе морских осадков и береговых отложений.

Современное осадконакопление в Азовском море имеет сложный характер, зависящий от близости источников поступления обломочного материала, глубин морского бассейна, активности проявлений гидродинамических процессов, условий развития и биомассы гидробионтов. Основной объем седиментационного материала поступает в море за счет абразии пород береговой зоны и дна, твердого стока рек и жизнедеятельности морских организмов и эпизодически – за счет материала, образующегося вследствие проявления грязевулканической и ветровой активности.

Большое значение для седиментогенеза в Азовском море имели тектонические движения голоценового возраста, которые отразились в современном рельефе, создавая условия для накопления или размыва морских осадков.

Так, основной район аккумуляции осадочного материала в море приурочен к площади Индоло-Кубанского прогиба, испытывающего на протяжении всего голоцена опускание со скоростью 3 мм/год (в отдельных районах несколько выше). Участки дна с интенсивностью движений менее 1 мм/год характеризуются значительно меньшими объемами осаждающегося на них седиментационного материала и даже абразией коренного субстрата дна [Хрусталёв, 1989].

Проявления современных тектонических движений в пределах морской акватории часто носят разнонаправленный характер. Если участок земной поверхности, приуроченный к району Таганрогского залива, на современном этапе характеризуется восходящими движениями со скоростью 0,5–1,1 мм/год, то северное побережье и прилегающий участок морской акватории с неогена до настоящего времени испытывают дифференцированные движения со скоростью от +2,0 мм/год до –2,0 мм/год (рис. 1.8).



Рис. 1.8. Схема скоростей голоценовых тектонических движений, мм/год [Панов, Хрусталев, 1966]: 1 – от 1 до 0; 2 – от 0 до –1; 3 – от –1 до –2; 4 – от –2 до –3; 5 – больше –3

В современное время тектонические движения характеризуются опусканиями со скоростью от –0,5 (г. Бердянск) до –2,0 мм/год (г. Геническ).

В южном районе моря, приуроченном к Индоло-Кубанскому прогибу, скорости погружения в голоценовое время максимальны и превышают 3 мм/год [Хрусталеv, Щербаков, 1974; Мамыкина, Хрусталеv, 1980].

Формирование осадочного покрова дна Азовского моря происходило на фоне повышающегося уровня моря (нимфейская стадия), чередующегося с кратковременными регрессивными фазами. Источники питания моря аллохтонным и автохтонным седиментационным материалом в голоцене предопределили развитие на площади морского дна главным образом терригенных осадков – от глинистых илов до песков. Биогенные осадки, несмотря на высокую биопродуктивность Азовского моря (в первую очередь бентосных моллюсков), имеют ограниченное распространение, и максимальное развитие они получили на аккумулятивных формах рельефа: банках, береговых валах и косах. Довольно часто в донных отложениях преобладающая фракция не выделяется, что дает основание относить их к осадкам смешанного типа [Шнюков и др., 1974; Матишов, 2007а, б].

Глинистые илы, в которых содержание частиц менее 0,01 мм, составляют более 70 %; в пределах акватории Азовского моря занимают максимальные площади дна в центральной части морского водоема, где они приурочены к областям максимальных глубин (10–14 м). В них содержание ракушечного материала обычно не превышает 10 % (рис. 1.9).

Кроме центральной и южной частей моря илы локально накапливаются в лиманах и заливах, а также выстилают днища ложбин, протягивающихся между аккумулятивными формами рельефа. В частности, днища Бейсутской и Ачуевской ложбины на значительном протяжении выстланы илом с примесью песчано-алевритовой фракции (фракция < 0,01 мм составляет более 50–70 %). Характерный узкий ареал глинистых илов наблюдается в днище осевой ложбины Таганрогского залива на глубине 5–10 м. Данная ложбина в плане соответствует долине палео-Дона. Глинистые илы (фракция < 0,01 мм составляет более 85 %) залегают в Железинской и других понижениях морского дна при глубине 12–14 м. Все илистые осадки, залегающие здесь, содержат большое количество органического вещества ($C_{\text{орг}}$) и почти повсеместно имеют специфический запах сероводорода. Содержание песчаной фракции в поверхностном горизонте глинистых илов центральной части моря находится в среднем от 0,3 до 2,5 % и обусловлено наличием обломков створок раковин донных организмов. По мере приближения к побережью, содержание песчаных и алевритовых частиц в морских осадках постепенно увеличивается.

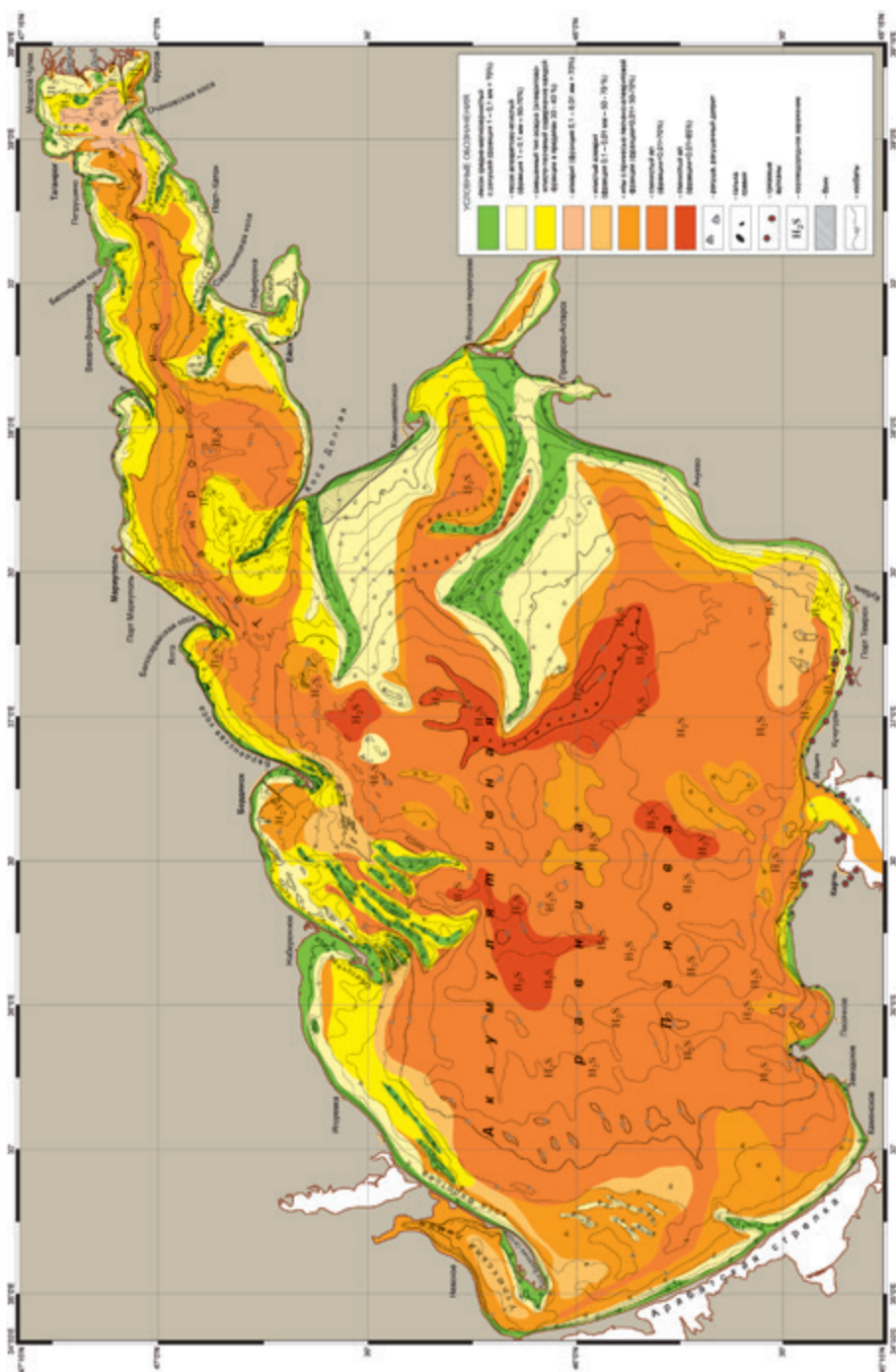


Рис. 1.9. Карта донных отложений Азовского моря [Матишов, 2007а]

На участках дна по периферии аккумулятивной равнины состав донных осадков определяется близостью берега, глубинами моря и морфологическими особенностями дна. В морских заливах, расположенных в северной части акватории, дифференциация осадочного материала затруднена вследствие большого количества аккумулятивных форм, препятствующих его переносу на более низкий батиметрический уровень. В результате в составе отлагающихся здесь илов возрастает доля песчаных и алевритовых частиц. Характерным участком акватории, в пределах которого значительную площадь дна занимают подобные илистые отложения, являются устьевые области Бердянского и Белосарайского заливов.

Отложения, залегающие на юго-западе Азовского моря на площади Арабатского залива, представлены глинистыми илами с примесью ракушечного материала. В районе Арабатской стрелки эти илы замещаются более крупными разностями осадков, в составе которых начинает существенно преобладать карбонатный материал песчано-гравийной размерности (рис. 1.9).

Подводный склон дна перед Керченским проливом и на площади Темрюкского залива отличается быстрым нарастанием глубин до 10 м. Далее к северу угол наклона поверхности дна выполаживается. Сравнительно однородный характер строения рельефа дна с глубинами, понижающимися к центральной части моря, а также параметры гидродинамического режима в этой части акватории (волнение, течения) способствовали накоплению в этих районах глинистых илов. В глинистых илах устьевой части Темрюкского залива возрастает содержание песчано-алевритовой фракции. В кутовой области залива происходит постепенное фаціальное замещение илов на осадки смешанного типа, а далее к берегу – на пески, обогащенные ракушей и ракушечным детритом.

Алевриты (содержание фракции $0,1-0,01 \text{ мм} > 50 \%$) в Азовском море распространены локально и в чистом виде встречаются на нескольких участках дна. Наиболее обширные площади распространения этого типа осадков характерны для Таганрогского залива (рис. 1.9). Это тонкозернистые отложения, связанные постепенными латеральными переходами как с илами различного гранулометрического состава, так и с песчаными отложениями. Площадь распространения алевритов контролируется глубинами, которые редко превышают 4 м, и твердым стоком рек – основным поставщиком этого материала. Другим фактором, определяющим присутствие этого типа осадка, является близость берегов, сложенных лёссовидными суглинками.

Смешанный тип донных отложений – характерное явление седиментогенеза Азовского моря [Шнюков и др., 1974; Хрусталеv, 1999; Матишов, 2007a]. Их отличительная черта – смесь в близких пропорциях (от 20 до 40 %) фракции ила, алеврита и песка, включая обломочный материал раковин. Ареалы смешанных осадков тяготеют к прибрежным участкам акватории, к подножию многих банок открытого моря, а также к локальным участкам дна в крупных заливах. В качестве примера распространения такого типа осадков следует отметить восточную часть Таганрогского залива, кутовые части Бердянского, Темрюкского и Ясенского заливов, а также районы, расположенные вокруг подводных гряд и валов.

Степень сортировки смешанных осадков зависит от взаимодействия при процессе осадконакопления сразу нескольких факторов. Определяющими являются геоморфологический, гидродинамический и гидробиологический факторы. Также большую роль при образовании морских осадков смешанного типа играют близость абразионно-обвальных берегов, биопродуктивных зон моря и отчасти вектора главенствующих воздушных потоков во время пыльных бурь.

Пески в Азовском море протягиваются узкой полосой вдоль берега до глубин 2–6 м, а также распространены на подводном береговом склоне кос Бирючья, Обиточная, Бердянская, Белосарайская, Кривая, Беглицкая, Очаковская, Чумбурская, Долгая, Камышеватская. В вещественном составе отложений преобладает кварцевый песок с примесью ракушечного материала либо почти полностью ракушечный материал.

Наиболее широкое распространение в Азовском море получили пески, образованные в результате разрушения створок раковин моллюсков. Подобные отложения слагают подводные банки на глубине 1–9 м. В Таганрогском заливе это касается подводных продолжений кос Долгая, Сазальницкая, Долгенькая, Чумбурская, Очаковская, Петрушина, Беглицкая и Песчаных островов (рис. 1.9). Гравийная фракция песков, как правило, сложена целыми створками раковин и их детритом. В составе песчано-алевритовой фракции совместно встречается как ракушечный, так и терригенный материал.

В северной части моря на расстоянии 20–30 км от берега к востоку от кос Обиточная и Бердянская облик дна определяют узкие пологие песчаные валы и гряды. В песчаных осадках гряд преобладают ракушечник и крупные органогенно-детритусовые пески, которые вниз по склону замещаются илистыми органогенно-детритусовыми песками и ниже, к днищам ложбин, илистыми осадками с примесью ракушечного материала.

На вершинах сравнительно крупных для Азовского моря поднятий дна (длиной 35–50 км) – банках Еленина, Железинская, Ахтарская и Ачуевская – распространены самые значительные для открытого моря площади песчано-ракушечных осадков (фракция 1,0–0,1 мм – более 70 %). На подводном склоне этих банок залегают алевритово-илистые пески. В них фракция песка составляет до 50–70 %. Во многих местах отложения аккумулятивных форм представляют собой ракушечник с песчано-алевритово-илистым заполнителем. К берегу в отложениях аккумулятивных структур возрастает доля частиц пелитовой размерности (рис. 1.9).

Максимальные объемы аккумуляции песчано-ракушечных отложений отмечаются в прибрежной зоне Азовского моря в районах распространения береговых кос. Здесь аккумулятивные тела сложены песчано-ракушечными наносами мощностью до 4 м и залегают на породах как плейстоценового, так и голоценового возрастов [Tesakov et al., 2007; Матишов и др., 2020].

В целом, как показывают данные многочисленных грунтовых съемок акватории Азовского моря, проводившихся сотрудниками ЮНЦ РАН в последние годы, на акватории Азовского моря можно выделить несколько районов с различными литодинамическими условиями, отличающимися друг от друга глубинами, строением рельефа дна, характером проявлений тектонических движений, гидродинамическим режимом и гидрологическими характеристиками.

Распределение донных осадков по площади дна Азовского моря выглядит следующим образом: от центральных районов моря к его периферийным участкам происходит последовательная смена от более тонких осадков – глинистых илов, залегающих на максимальных глубинах, – к осадкам алевритовой и песчаной размерности. В зонах, где отмечается влияние нескольких источников питания бассейна седиментационным материалом и где не происходят достаточно активные процессы механической дифференциации вещества, наиболее распространен пользуется смешанный тип осадков с неярко выраженными пиками распределения фракций на графике гранулометрического состава. Для всех отложений характерна примесь ракушечного материала, которая в виде отдельных створок раковин или детрита может присутствовать во фракциях морских осадков и нередко в количестве близком к 100 % от их состава [Шнюков и др., 1974; Матишов, 2007б; Польшин, 2006, 2009, 2012].

Состав и мощность донных отложений в условиях азовского мелководья в значительной степени определялись неоднородностью и расчленен-

ностью донного рельефа [Матишов и др., 2010]. На вершинах банок и гряд, максимальное распространение получили ракушечник и разнотерристые органогенно-детритовые пески. С увеличением глубин происходит их фациальное замещение на илистые органогенно-детритовые пески, которые к подошве банок заменяются заиленной ракушкой и илистыми осадками различного гранулометрического состава.

Использование результатов абсолютного датирования донных отложений позволило нам произвести оценку интенсивности поступления осадочного материала на акваторию моря за последние несколько тысяч лет его развития. По нашим данным, полученные усредненные значения скоростей осадконакопления на протяжении древне- и новоазовского этапа развития Азовского моря могли меняться от 0,2 до 2 мм/год в зависимости от районов аккумуляции аллохтонного и автохтонного материала. Минимальные значения скоростей седиментации приурочены к зонам транзита и слабой аккумуляции осадочного материала и совпадают с направлениями основных морских течений. В геоморфологическом плане эти зоны приурочены к участкам абразионных и абразионно-аккумулятивных равнин. Максимальные значения скорости осадконакопления характерны для центрального района моря, являющегося основной зоной аккумуляции и совпадающего с областью максимальных глубин.

Свои коррективы в распределение осадочного материала вносит тектонический режим. Так, скорость седиментогенеза значительно выше в районах, приуроченных к прогибам и испытывающих в голоцене опускание со скоростью более 3 мм/год. Участки с интенсивностью движений от 1 до 3 мм/год характеризуется меньшей скоростью осадконакопления, а со значениями менее 1 мм/год – даже абразией коренного субстрата дна [Хрусталева, 1989].

1.6. Содержание органического вещества в донных отложениях Азовского моря

Сорбционные свойства органического вещества (ОВ) по отношению к тяжелым металлам и радионуклидам хорошо известны [Матишов и др., 2006; 2007; 2015]. Кроме этого, высокая концентрация органического вещества в донных отложениях может вызывать дефицит кислорода, приводящий к гипоксии и заморным явлениям [Хрусталева, 1989; Овсяный и др., 2015].

По результатам проведенных сотрудниками ЮНЦ РАН научных исследований было установлено, что содержание ОВ подвержено флуктуа-

циям в зависимости от гранулометрического состава морских осадков и коррелируется с содержанием частиц пелитовой размерности в них ($< 0,01$ мм). Максимумы концентраций органического вещества в донных отложениях Азовского моря отмечены в районах распространения глинистых илов, в которых доля пелитовых частиц превышает 60–80 %. Так, в илах, залегающих в центральной части моря на глубинах 11–12 м, зафиксировано содержание ОВ на уровне 5,58 % (ст. 12) и 6,14 % (ст. 6). При этом количество пелитовых частиц в этих осадках превышает 80 %, а частицы алевритовой размерности содержатся в количестве менее 20 %. С уменьшением содержания частиц пелитовой размерности в осадках центральной области моря концентрация органического вещества закономерно снижается (рис. 1.10).

Содержания органического вещества в донных отложениях, залегающих в восточной и юго-восточной частях Азовского моря, колебались от 1,68 % (ст. 15) до 6,12 % (ст. 14). В анализируемых пробах из этих районов преобладал ракушечный материал песчано-гравийной размерности. Содержание пелитовых частиц было менее 20 %. Такие отличия в концентрации ОВ в морских осадках со схожим гранулометрическим составом могут быть обусловлены аккумуляцией продуктов жизнедеятельности донных организмов, действием твердого стока р. Кубань и условиями захоронения органики на локальных участках дна.

В южной части акватории Азовского моря в глинистых и глинисто-алевритовых илах, залегающих в интервале глубин от 8 до 10 метров, концентрация ОВ изменялась от 3,19 % до 4,14 %. На участках дна, граничащих с Керченским проливом, содержание органического вещества в алевритово-глинистых илах было 3,45 % (ст. 8). В северной части Керченского пролива в осадках смешанного типа (илисто-песчано-алевритовых), залегающих на глубине 4,5 метров, его концентрация снижается до 1,34 % (ст. 9).

В пробах морских осадков, отобранных на акватории Таганрогского залива, содержание органического вещества находилось в интервале от 0,90 до 5,04 %. Максимумы его концентрации (в пределах 4–5 %) установлены в глинистых илах, которые выстилают дно залива на глубинах 6–7 м в центральной и западной частях. При этом доля частиц пелитовой размерности в них составляет 60–70 %. В осадках смешанного типа содержание ОВ увеличивается с востока на запад залива от 0,90 % (ст. 1) до 1,28 % (ст. 4). По данным гранулометрического анализа содержание пелитовой фракции в этих отложениях составляло около 30 %, песчано-гравийной, сложенной кварцевым песком и ракушечным детритом, – 40–50 %.

жениях. Для этого определенная массовая доля органического вещества делилась на коэффициент 1,8 [Скопинцев, 1950].

Проведенный нами анализ данных показал схожее распределение по площади дна различных литологических типов морских осадков и некоторое отличие в содержании органического углерода ($C_{\text{орг}}$) в них. Так, в пробах донных отложений, отобранных ИО РАН в феврале – марте 2008 г. на участке акватории Азовского моря, граничащем с Керченским проливом, максимальные значения концентрации $C_{\text{орг}}$ достигали 5,08 %. В северной части пролива максимальные концентрации достигали 3,35 % при среднем значении 1,25 % [Овсяный и др., 2015]. По данным Ю.А. Фёдорова, в пробах донных осадков, отобранных в российском секторе Азовского моря в сентябре 2006 г., содержание $C_{\text{орг}}$ изменялось от 0,29 до 3,19 %, составляя в среднем 1,6 % [Фёдоров и др., 2009]. При этом концентрация органического вещества в донных отложениях постепенно увеличивалась от восточной части Таганрогского залива к юго-востоку моря и Темрюкскому заливу.

По результатам наших исследований содержание органического углерода в отложениях Таганрогского залива изменялось в диапазоне от 0,5 до 2,8 %. В пробах, отобранных с поверхностного горизонта дна в юго-восточной части Азовского моря, оно изменялось от 2,43 до 3,14 %, а в северной части Керченского пролива было на уровне 1,97 %.

1.7. Изменение условий осадконакопления в бассейне Азовского моря под влиянием природных и антропогенных факторов

Данные многолетних научных исследований показывают, что характер осадконакопления за последние 50 лет существенно изменился. Во многом эти изменения связывают с влиянием человеческого фактора. Техногенное загрязнение, регулирование речного стока, дноуглубительные работы способствовали изменению многолетних (фоновых) параметров морского водоема.

В настоящее время основными источниками загрязнения Азовского моря являются коммунально-хозяйственные стоки многочисленных населенных центров на побережье, крупные промышленные предприятия и портовые комплексы, водный транспорт, каналы оросительных систем, а также транзитный перенос загрязняющих веществ с водосборных бассейнов рек Дона и Кубани. Со второй половины XX в. в морских осадках Азовского моря стали фиксироваться радиоактивные нуклиды,

являющиеся следствием испытания атомного оружия в атмосфере, а впоследствии – аварии на Чернобыльской АЭС.

Попадая на акваторию моря, промышленные отходы вовлекаются в общий процесс осадконакопления, что выражается в формировании естественно-техногенных типов донных отложений. Среднее содержание техногенного материала в донных осадках Азовского моря составляет около 5,0 %, увеличиваясь вблизи городов Таганрог, Мариуполь и Ейск до 40 %. Примеси техногенных частиц, загрязняющих донные отложения, в основном представлены отходами металлургических комбинатов и обогатительных фабрик – шлаками и золой, а также строительным материалом, углем и нефтепродуктами. Подводные техногенные ландшафты, сформировавшиеся под влиянием портовых комплексов, речного стока и промышленных зон, распространяются в море на расстояние до 50 км [Беспалова и др., 1999; Хрусталёв, Ивлиева, 1999].

Уровень радиоактивного загрязнения в бассейне Азовского моря, наиболее сильно проявившийся после аварии на Чернобыльской АЭС, также зависит от условий седиментации. В этой связи вполне очевиден эффект смыва и миграции радиоизотопов с площади водосборного бассейна с терригенным материалом. Особое значение в рециркуляции техногенных радионуклидов имеет режим поступления в воду взвешенного вещества в период сезонных паводков и ветровом перемешивании. При этом взмучивание придонного слоя вызывает десорбцию радионуклидов, а также дифференциацию и переотложение донных осадков. Специфические для Азовского моря условия смешения пресных и соленых вод также играют важную роль в сорбции и осаждении радиоизотопов.

Данные по радиоактивному загрязнению Азовского моря за 2019 г. показывают, что на современном этапе гранулометрический состав морских осадков продолжает играть определяющую роль в накоплении радиоизотопов [Матишов и др., 2020]. Активность радионуклидов в донных отложениях главным образом определяется наличием фракций мелкого и крупного пелита. В настоящее время наибольшая удельная активность потенциально опасного изотопа ^{137}Cs (в пределах 50–65 Бк/кг) установлена в глинистых илах, залегающих в центральной части Азовского моря в диапазоне глубин от 10 до 13 м. Именно в этом районе моря на дне аккумулируется основная масса морских осадков, в гранулометрическом составе которых преобладают частицы размером от 1 до 10 мкм (рис. 1.11).

После аварии на Чернобыльской АЭС наметилось устойчивое снижение активности радионуклидов. В 1986 г. удельная активность ^{137}Cs

в морских осадках Таганрогского залива составляла от 2 до 60 Бк/кг. В осадках поверхностного горизонта дна центральной части Азовского моря, отобранных после аварии на Чернобыльской АЭС, отмечались уровни удельной активности ^{137}Cs , достигавшие 80 Бк/кг. Следующие два года характеризовались более высоким содержанием ^{137}Cs в донных отложениях залива, которое изменялось от 22,2 до 264 Бк/кг [Матишов, Матишов, 2002; Матишов и др., 2015]. В 2001–2004 гг. удельная активность ^{137}Cs находилась в диапазоне от 0,4 до 85 Бк/кг и изменялась в зависимости от гранулометрического состава донного грунта. В алевролитах и песках, накапливающихся в мелководных районах Таганрогского залива с активным гидродинамическим режимом, удельная активность радиоцезия не превышала 7,4 Бк/кг [Матишов, Матишов, 2002; Матишов и др., 2015].

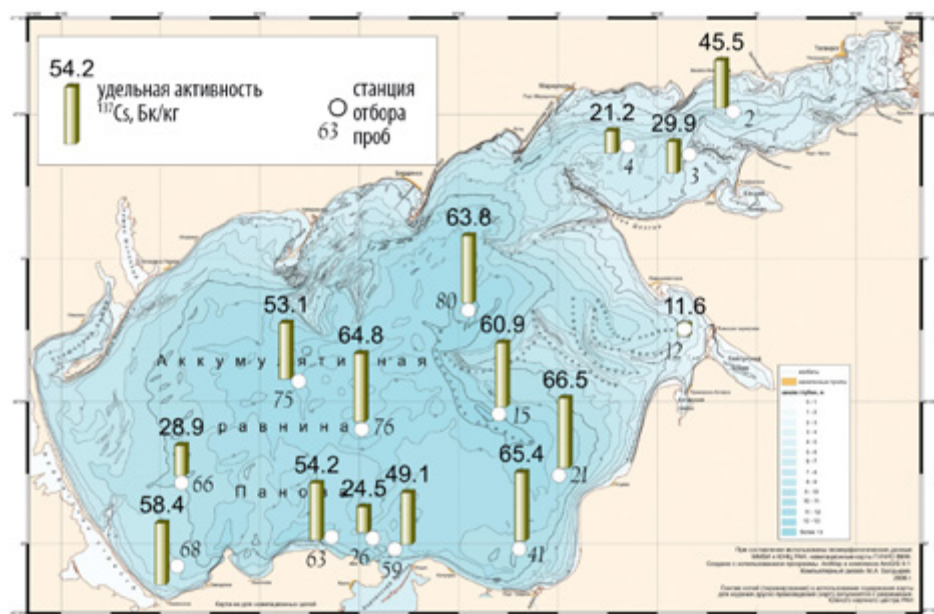


Рис. 1.11. Удельная активность ^{137}Cs в донных отложениях в Азовском море (по данным экспедиции на НИС «Денеб», июль 2019 г.)

Изменения радиоактивного фона в бассейне Азовского моря прослеживается и при изучении разрезов колонок донных отложений. Так, в морских осадках, залегающих в интервале 4–6 см от поверхности дна, удельная активность ^{137}Cs достигала 127 Бк/кг. Их накопление соотносится с максимумом радиоактивного загрязнения акватории моря после аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г. Второе высокое значение (88,4 Бк/кг), зафиксированное в отложениях в 8–10 см под поверхностью дна, вероятно,

связано с испытаниями ядерного оружия, происходившими в 1950–1960-х гг. [Матишов и др., 2003; Матишов и др., 2015].

К примерам воздействия антропогенного фактора на процесс современного осадконакопления также следует отнести строительство крупных гидротехнических объектов на основных реках региона, приведшее к сокращению доли речных наносов в общем седиментационном балансе, и проведение дноуглубительных работ в границах акватории Азовского моря [Бронфман и др., 1979; Бронфман, Хлебников, 1985; Хрусталеv, 1989, 1999; Хрусталеv, Ивлиева, 1999].

Огромное влияние на процессы седиментогенеза в акватории Азовского моря оказывает речной сток [Бронфман и др., 1979; Хрусталеv, 1989]. Он является основным элементом водного баланса, который в значительной степени влияет на физико-химическую и гидробиологическую характеристику водоема. В условиях естественного режима речной сток составлял 12 % от объема всего моря [Кукса, 1994]. По существу, Азовское море представляет собой зону смешения речных и черноморских вод, для которой характерна большая пространственная изменчивость солености, солевого состава и концентрации биогенных веществ [Хрусталеv, 1989].

Со стоками рек из гумидной зоны в морской бассейн поступают значительные объемы растворенных и взвешенных веществ, осаждение которых происходит уже в условиях аридного климата, что предопределяет вещественный состав донных отложений и ход осадочного процесса. Для Азовского моря характерна высокая степень неравномерного питания речными водами. Основными водными артериями бассейна, обеспечивающими 95 % речного стока и участвующими в формировании гидрологического и гидрохимического режима моря, а также поставляющими на его акваторию значительное количество терригенного материала, являются две крупные реки региона – Дон и Кубань. Остальные мелкие реки, стекающие в морской бассейн в основном с северного и северо-восточного берегов, существенного влияния на процессы осадконакопления не оказывают.

В связи с интенсивным антропогенным преобразованием речного стока, происходившим во второй половине XX в., в балансе осадочного вещества Азовского моря резко снизилась доля речных наносов. Также в них отмечается изменение фракционного состава взвеси в сторону увеличения содержания более мелких частиц (пелитовой и алевроитовой размерности).

До зарегулирования твердый сток р. Кубань составлял от 5,6 до 8,2 млн т/год. После создания Краснодарского водохранилища сток

наносов существенно сократился и в период с 1987 по 1999 г. составлял 1,14 млн т/год. При этом 0,38 млн т/год наносов поступало в море по рукаву Протока, а 0,76 млн т/год – по рукаву Кубань [Сорокина, 2008].

Зарегулирование реки Дон привело к масштабной трансформации режима его твердого стока [Бронфман, 1981; Бронфман, Хлебников, 1985; Михайлов, 1997; Матишов и др., 2017]. С момента строительства Цимлянского гидроузла в 1952 г. естественный процесс седиментации на Нижнем Дону и взморье был нарушен. Произошло замедление паводковых течений, сокращение твердого стока Дона, изменение его фракционного состава (в речной взвеси снизилось содержание частиц песчаной размерности). Отсутствие паводкового дренажа и маловодье привели к заилению многочисленных протоков и гирл дельты. За последние полвека в устьевых зонах сформировался характерный слой илистых отложений мощностью 0,5–1,5 м. Происходит интенсивное зарастание тростником протоков донской дельты и участков устьевого взморья. В современный период выдвижение морского края дельты фиксируется в районах впадения в залив крупных рукавов на южном и северном флангах. На всем остальном протяжении отмечается ее деформация и размыв.

В естественных условиях (до 1952 г.) основная доля донского твердого стока поступала с водосборного участка Верхнего и Среднего Дона (255 тыс. км²) и водосборного участка реки Северский Донец (98,9 тыс. км²). Среднегодовое количество твердого стока по данным наблюдения на замыкающем гидрологическом посту (ГП) «Раздорская» в период с 1932 по 1952 г. составил 4358 тыс. т при средней мутности 182 г/м³ (рис. 1.12). Для исследуемого ряда наблюдений коэффициент изменчивости (C_v) составил 0,56, что говорит о неоднородности и значительной межгодовой изменчивости суммарного твердого стока.

Резкое изменение режима твердого стока реки Дон наблюдается после строительства Цимлянского гидроузла и введения в эксплуатацию Цимлянского водохранилища. С этого времени 95 % твердого стока с водосборного участка Верхнего и Среднего Дона стало аккумулироваться в границах акватории Цимлянского водохранилища. При этом выделяем два периода режима твердого стока – 1953–1971 гг. и 1972–2018 гг.

В целом для периода 1953–1971 гг. наблюдается значительное снижение объемов твердого стока, поступавшего на участок Нижнего Дона. Его среднегодовой объем в это время составил 2796 тыс. т, а мутность вод Нижнего Дона уменьшилась до 111 г/м³. Для хроноинтервала 1972–2017 гг. среднее значение твердого стока составило 500 тыс. т

(минимум 2010 г. – 50 тыс. т, максимум 1979 г. – 2500 тыс. т). При этом средние показатели мутности в этот период уменьшились до 25 г/м^3 (рис. 1.12).

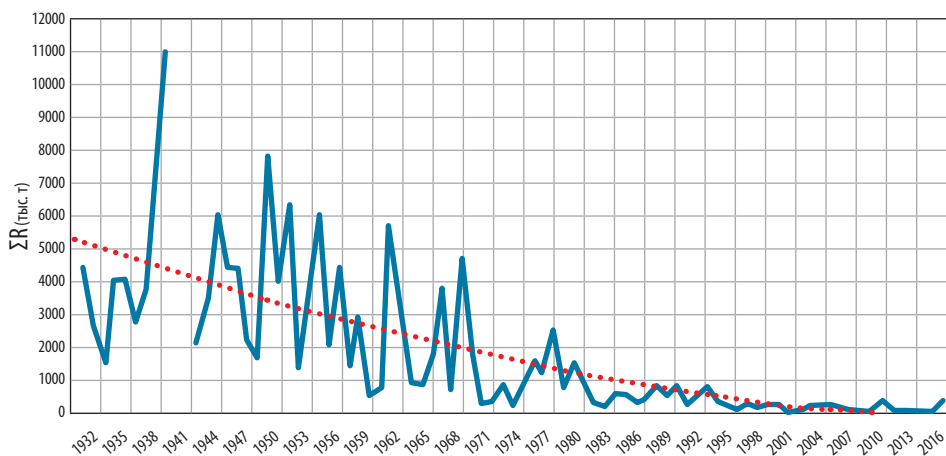
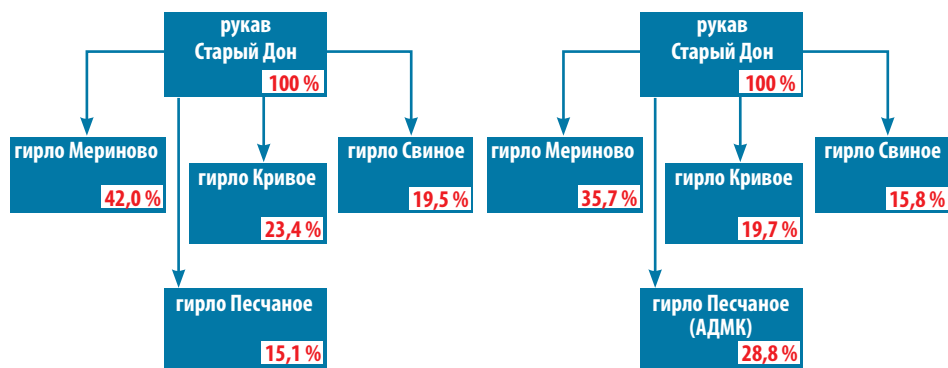


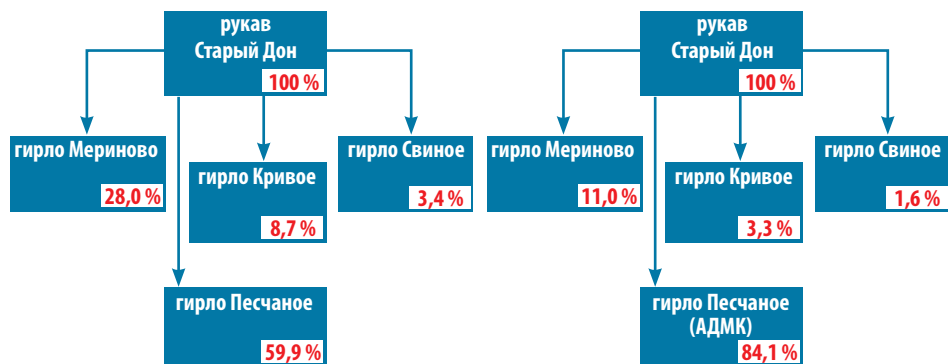
Рис. 1.12. Годовой сток наносов (тыс. т) р. Дон
в период с 1932 по 2017 г.
(по данным наблюдений на ГП «Раздорская»)

Проведение дноуглубительных работ, которые начались с середины XIX в., также повлияло на характер современного осадконакопления на участках акватории Азовского моря, граничащих с донской дельтой [Белявский, 1872; Лисицын, 1925]. После введения в строй в 1928 г. Азово-Донского морского канала (АДМК) произошло значительное перераспределение стока основного узла разветвления Дона между рукавами Большая Каланча и Старый Дон. Доля водного стока в рукаве Старый Дон достигла 30 %. Увеличились скорости стоковых течений как в речной, так и морской части канала. Произошла трансформация и перераспределение стока на южном фланге дельты Дона на узловом участке между гирлами (рукавами) Свиное, Мериново, Песчаное и Кривое. Объемы стока по гирлу Песчаное, по которому проложена трасса канала, увеличилась в 4–5,6 раза. Напротив, в других протоках в этой части донской дельты отмечается устойчивое уменьшение стока: в гирлах Свином и Кривом в 6–12 раз, в гирле Мериново – в 1,5–3,8 раза (рис. 1.13). Также резко уменьшилась проточность этих рукавов, т.е. скорость стокового течения. Так, например, средняя скорость стокового течения в гирле Свином уменьшилась в 1,5–3,6 раза (рис. 1.13).



Распределение стока рукава Старый Дон в период 1924–1927 гг.

Распределение стока рукава Старый Дон в период 1928–1932 гг.



Распределение стока рукава Старый Дон в многоводный 1963 г.

Распределение стока рукава Старый Дон в маловодный 1972 г.

Рис. 1.13. Распределение стока р. Дон (рукав Старый Дон) в различные годы

На современном этапе наблюдается процесс заиления этих протоков и гирл, что свидетельствует о постепенном их отмирании. Кроме того, в настоящее время отмечается деформация переднего края дельты на устьевом участке. Ее выдвигание фиксируется в районах впадения в залив крупных рукавов на южном и северном участках. Неравномерное приращение происходит в виде образования новых мелких островов.

Дноуглубительные работы и дампинг грунта на акватории Азовского моря, вносящие коррективы в естественный процесс седиментации, наиболее широко проводятся в Таганрогском заливе. В этом районе существуют и функционируют многочисленные судоходные каналы и свалки

грунта. Самые протяженные (до 20–30 км) и глубокие (более 5 м) подходные каналы прорыты к портам Таганрог, Мариуполь, Ейск и Бердянск. Глубина подходного канала к Мариупольскому порту составляет 7,5 м при ширине до 100 м. Общая длина подходных каналов г. Мариуполя составляет 26,5 км при площади повреждения дна 4,9 км². Протяженность проложенного параллельно осевой линии Таганрогского залива Азово-Донского канала достигает 26 км при ширине в 80 м и глубине 4 м. Подходной канал Таганрогского порта имеет длину 14 км при глубине 5 м. Длина канала Ейского порта превышает 21 км при ширине в 75 м и глубине, превышающей 6 м [Хрусталев, Ивлиева, 1999].

В незначительном удалении от подходных каналов обустроены многочисленные свалки грунта. По данным Азовской морской инспекции, на акватории Азовского моря функционируют 14 свалок грунта, 9 из которых находятся в Таганрогском заливе [Хрусталева, Ивлиева, 1999]. Объем донного грунта, ежегодно складированного на этих свалках, может составлять более чем 3 млн т [Ивлиева, 1993], что значительно превышает количество осадочного материала, поставляемое р. Дон, а также объем наносов, поступающих за счет абразии берегов Таганрогского залива.

В августе 2006 г. на Должанской косе Азовского моря внезапно поднялся уровень моря, отдыхавшие на косе люди и их автомобили были унесены в море, косу прорвало в нескольких местах, был нанесен ущерб зданиям и сооружениям. При этом сильного штормового ветра не наблюдалось. В июне 2010 г. на Ейской косе того же Азовского моря при полном штиле на всей акватории моря вдруг появилось мощное течение, которое смыло детей, бредущих по косе по колено в воде. В обоих случаях были жертвы. Анализ данных наблюдений над колебаниями уровня моря показал, что эти явления были вызваны сейшами.

Известно, что если какую-либо природную систему вывести из состояния равновесия под воздействием какой-то силы, система может мобилизовать некие внутренние механизмы, чтобы вернуться в исходное состояние. Когда вынуждающие силы прекращают свое воздействие, система некоторое время продолжает свободные колебания. Характеризуясь свойствами системы, флуктуации зависят от начального воздействия вынуждающей силы. Через некоторое время они прекращаются под действием силы трения, и система возвращается в состояние равновесия. Такие свободные колебания жидкости в замкнутых или полузамкнутых морях называются сейшей. Характер сейшевых движений и их роль в функционировании экосистемы моря может сильно различаться в различных морях. Эти процессы рассмотрены на примере сейшевых движений в двух полузамкнутых морях с небольшими площадями акваторий (в Азовском и Белом морях), расположенных соответственно на юго-западе и севере европейской части России (рис. 2.1)

Азовское море расположено между $45^{\circ}12'30''$ и $47^{\circ}17'30''$ с.ш., а также между $33^{\circ}38'$ и $39^{\circ}18'$ в.д. Белое море – между $68^{\circ}40'$ и $63^{\circ}48'$ с.ш., а также между $32^{\circ}00'$ и $44^{\circ}30'$ в.д. Площадь Азовского моря составляет около 39000 км^2 , объем 290 км^3 , глубина около 7 м, а максимальная – 14,4 м. Эти

же параметры для Белого моря составляют соответственно 90 000 км², 6 000 км³, 67 м и 350 м. Наибольшая длина Азовского моря от Арабатской стрелки до дельты Дона – 380 км, а максимальная ширина с севера на юг между вершинами Темрюкского и Белосарайского заливов – 200 км [Гидрометеорология ... Т. IV, 1991]. Наибольшая протяженность Белого моря от м. Канин Нос до г. Кемь 600 км, а наибольшая ширина между Архангельском и Кандалакшей 450 км [Gluhovskij, 1991].



Рис. 2.1. Районы изучения сейшевых движений на Белом и Азовском морях

Сейши представляют собой один из наиболее распространенных типов колебаний уровня в Азовском море. Однако несмотря на это, частотные и пространственные характеристики этих колебаний, а также их роль в формировании экстремальных уровней моря оставались малоизученными [Matishov, Inzhebeikin, 2009]. Лишь в некоторых публикациях [Курчатов, 1925; Гидрометеорология ... Т. 2. 1991; Manilyuk, Cherkesov, 1995] рассматриваются отдельные аспекты этого явления. Отчасти это объясняется сложной конфигурацией береговой линии из-за развития многочисленных узких барьерных кос и заливов, простирающихся далеко в сторону моря, крайней мелководностью бассейна или, точнее, протяженными отмелями, которые в сочетании с гидрометеорологическими факторами и речным стоком образуют сложные колебания уровня моря, сильно изменяющиеся в пространстве и времени.

Работ, посвященных исследованию собственных колебаний уровня Белого моря, совсем немного, и до недавнего времени характеристики сейшевых колебаний оставались неизвестными [Инжебеikin, 2005]. Это обусловлено, с одной стороны, близостью периодов сейшевых и сильных приливных колебаний в Белом море, а с другой – сложностью его берегов и рельефа дна. Действительно, в изучении сейшевых колебаний уровня в естественных бассейнах можно выделить два направления: первое – спектральный анализ временных рядов данных наблюдений над уровнями; второе – расчет собственных колебаний на основе аналитических зависимостей для бассейнов с простыми морфометрическими характеристиками или численного моделирования. В Белом море наблюдаются сильные приливные движения вод со значительным количеством дополнительных обертонов, частоты которых близки к частотам сейшевых осцилляций. Это затрудняет выделение сейшевых вариаций из спектра суммарных колебаний уровня. С другой стороны, сложность береговой черты и рельефа дна делало невозможным применение простых формул или аналитических методов решения уравнений, описывающих сейшевые колебания.

Данные о морфометрических характеристиках морей были взяты нами из навигационных карт. Кроме того, по Азовскому морю эти данные были уточнены посредством эхолотного зондирования [Матишов и др., 2009]. Были использованы также данные уровенных наблюдений на гидрометеорологических станциях и постах гидрометеорологической службы России и бывшего СССР, а также Южного научного центра Российской академии наук.

Для бассейнов произвольной сложной формы на вращающейся Земле основные методы расчета собственных колебаний были разработаны Платцманом [Platzman, 1972], Швабом и Рао [Shwab, Rao, 1976]. Метод Платцмана основан на «резонансной итерации», а в методе Шваба и Рао численно подбираются и решаются два набора ортогональных функций. Эти методы сравнительно трудоемки. Имеется работа Вюббера и Краусса [Wubber, Krauss, 1979], в которой собственные колебания в бассейне рассчитаны на основе численного решения уравнений мелкой воды с последующим спектральным анализом результатов счета. Гринберг [Greenberg, 1979] для вычисления собственного периода системы «бухта Фанди – залив Мэн» использовал другой метод. Он исходил из того, что энергия волны, переносимая через открытую границу полузамкнутого бассейна, будет максимальной, когда периоды волны и собственных колебаний совпадут. Выполненные расчеты дали результаты, которые хорошо совпадают с наблюдениями и интерпретируются с физической точки зрения. Этот подход использован также нами при исследовании сейшевых движений в Белом море [Инжебейкин, 2005] и в Азовском море [Matishov, Inzhebeikin, 2009]. Марамзин для расчета сейшевых колебаний в бассейнах произвольной формы применил метод конечных элементов (МКЭ) [Марамзин, 1985], который позже в работах [Иванов и др., 1994; Манилюк, Черкесов, 1994] был использован для изучения сейшевых вариаций уровней Азовского моря. Однако в указанных работах рассчитанные амплитудно-частотные характеристики сейш не соответствовали их реальным параметрам, поскольку в МКЭ-моделях на жидкостных границах с Чёрным морем использовано условие непротекания и не учтена так называемая устьевая поправка.

Сейши в Азовском и Белом морях могут быть вызваны резкими изменениями полей ветра или атмосферного давления при быстро перемещающихся над ними циклонах и антициклонах. В Азовском море сейши генерируют также входящие из Чёрного моря волны штормового нагона, а в Белом море – аналогичные волны, входящие в него из Баренцева моря. Для образования сейш достаточно сравнительно небольшой энергии, поэтому в гипермелководном Азовском море одной из причин сейшевых колебаний может быть также локальное обильное выпадение дождя над какой-то частью акватории моря, кратковременные весенние или дождевые паводки Дона или Кубани, а также попуски вод из Цимлянского и в меньшей степени Краснодарского водохранилищ. Морфометрические особенности каждого из морей влияют на харак-

теристики сейшевых колебаний, при этом последние могут иметь заметную амплитуду, если период собственных колебаний Азовского или Белого морей, отдельных заливов или их систем совпадают с периодом вынуждающего воздействия.

В основу разработанных в наших исследованиях моделей, базирующихся на теории мелкой воды, положена следующая система уравнений движения и неразрывности:

$$\frac{\partial u}{\partial t} - fv + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{ru}{H + \zeta} \sqrt{u^2 + v^2} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + fu + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{rv}{H + \zeta} \sqrt{u^2 + v^2} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(H + \zeta)u + \frac{\partial}{\partial y}(H + \zeta)v = 0, \quad (3)$$

где u и v – составляющие средних по глубине скоростей течений по осям X и Y ; H – глубина при невозмущенном уровне; ζ – отклонение уровня от невозмущенного состояния; $f = 2\omega \sin \varphi$ – параметр Кориолиса, ω – угловая скорость вращения Земли, r – коэффициент придонного трения. Вывод уравнений (1–3) дается во многих работах и основан на применении приближений теории длинных волн к уравнениям движения и неразрывности однородной несжимаемой жидкости с учетом вращения Земли (но на f -плоскости) в пренебрежении эффектами адвективной нелинейности. Действительно, согласно работам [Ле Блонд, Майсек, 1981], уравнения для f -плоскости, в которых пренебрегается изменениями с широтой локального вертикального компонента угловой скорости вращения Земли, применимы, если выполняется условие

$$\frac{L \cos \varphi_0}{R} \ll 1, \quad (4)$$

где R – радиус Земли, L – масштаб бассейна. Для исследуемых движений в Азовском море при максимальной протяженности от дельты Дона до п. Каменское (Керченский полуостров) в 380 км, средней широте

$\varphi_0 = 46,15^\circ$ это соотношение составляет менее 4×10^{-2} , что намного меньше единицы. Таким образом, в модели для Азовского моря принято $f = 1,052 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$. В Белом море при максимальной протяженности от Канина Носа до Поньгомы (Онежский залив) в 580 км, средней широте $\varphi_0 = 66,5^\circ$ это соотношение составляет около 4×10^{-2} , что также намного меньше единицы. Таким образом, в модели для Белого моря принято $f = 1,335 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$. Ускорение свободного падения для моделей обоих морей принималось постоянным и равным $g = 9,82 \text{ м/с}^2$. Аналогично плотность морской воды полагалась постоянной и равной 1000 кг/м^3 . В принятой постановке задачи нелинейные члены учитываются изменением глубины при колебаниях уровня и квадратичным придонным трением.

На основе полученных в ЮНЦ РАН современных натурных данных о морфометрических характеристиках Азовского моря [Матишов, 2006а, б] и информации, полученной из навигационных карт для Белого моря, моря аппроксимировались соответствующими сеточными областями, имеющими, например, для Азовского моря 161 узел по оси X и 250 узлов по оси Y с шагом 1,5 км по обеим осям (рис. 2.2). Полученные нами глубины моря при вводе в модели были сглажены с использованием фильтра:

$$H_{i,j} = H_{i,j} \beta + \frac{1-\beta}{4} (H_{i,j} + H_{i,j-1} + H_{i-1,j} + H_{i+1,j}), \quad (5)$$

где $\beta = 0,7$.

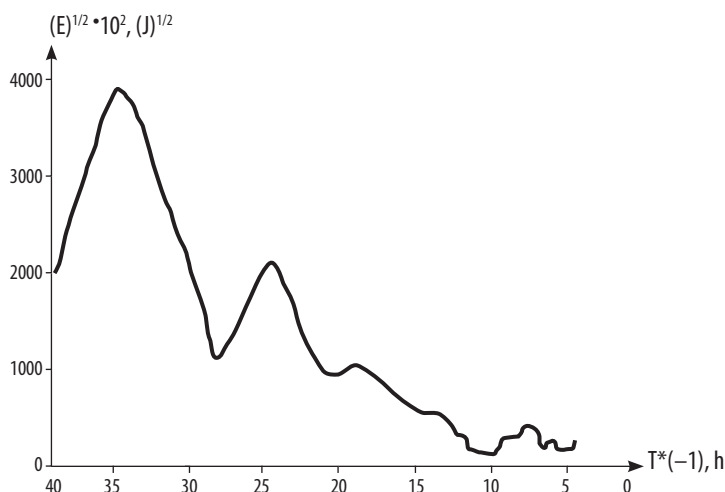


Рис. 2.2. Колебания суммарной энергии при различных частотах (периодах) вынуждающей силы (для Азовского моря)

Для численного решения системы исходных уравнений мелкой воды выбрана явная конечно-разностная схема, построенная на разнесенной сетке [Мезингер, Аракова, 1979] (рис. 2.2):

$$\zeta_{i,j}^{n+1} = \zeta_{i,j}^n - \frac{\Delta t}{\Delta h} \left[(Du)_{i,j}^n u_{i,j}^n - (Du)_{i,j-1}^n u_{i,j-1}^n + (Dv)_{i-1,j}^n v_{i-1,j}^n - (Dv)_{i,j}^n v_{i,j}^n \right], \quad (6)$$

$$u_{i,j}^{n+1} = u_{i,j}^n + \Delta t \left\{ f\tilde{u}_{i,j}^n - \frac{g}{\Delta h} (\zeta_{i,j+1}^{n+1} - \zeta_{i,j}^{n+1}) + \frac{(\tau_x)_{i,j}^{n+1}}{(Du)_{i,j}^{n+1}} - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial P_a}{\partial x} \right)_{i,j}^{n+1} - \frac{ru_{i,j}^{n+1}}{(Du)_{i,j}^{n+1}} \sqrt{(u_{i,j}^n)^2 + (\tilde{v}_{i,j}^n)^2} \right\}, \quad (7)$$

$$v_{i,j}^{n+1} = v_{i,j}^n + \Delta t \left\{ -f\tilde{v}_{i,j}^{n+1} - \frac{g}{\Delta h} (\zeta_{i,j}^{n+1} - \zeta_{i+1,j}^{n+1}) + \frac{(\tau_y)_{i,j}^{n+1}}{(Dv)_{i,j}^{n+1}} - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial P_a}{\partial y} \right)_{i,j}^{n+1} - \frac{rv_{i,j}^{n+1}}{(Dv)_{i,j}^{n+1}} \sqrt{(\tilde{u}_{i,j}^{n+1})^2 + (\tilde{v}_{i,j}^n)^2} \right\}, \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} (Du)_{i,j}^n &= \frac{1}{2} (H_{i,j} + \zeta_{i,j}^n + H_{i,j+1} + \zeta_{i,j+1}^n) \\ (Dv)_{i,j}^n &= \frac{1}{2} (H_{i,j} + \zeta_{i,j}^n + H_{i+1,j} + \zeta_{i+1,j}^n) \end{aligned} \right\}, \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} \tilde{u}_{i,j}^n &= \frac{1}{4} (u_{i-1,j-1}^n + u_{i,j-1}^n + u_{i-1,j}^n + u_{i,j}^n) \\ \tilde{v}_{i,j}^n &= \frac{1}{4} (v_{i+1,j}^n + v_{i+1,j+1}^n + v_{i,j}^n + v_{i,j+1}^n) \end{aligned} \right\}. \quad (10)$$

В формулах (6)–(10) $(Du)_{i,j}^n$ и $(Dv)_{i,j}^n$ обозначают суммарные глубины соответственно в u - и v -узлах; i, j – целые индексы по осям Y и X ; n – целый индекс по времени; Δh – шаг по пространству, одинаковый как по оси X , так и по оси Y ; Δt – шаг по времени, выбранный из условия устойчивости численной схемы Куранта – Фридрихса – Леви:

$$\Delta t < \frac{\Delta h}{\sqrt{2gH_{\max}}}.$$

В океанологии подобная схема с разностями «вперед – назад» применялась Силеки [Sielecki, 1968], а для моделирования штормовых нагонов Флэзером, Хипсом и Генри [Heaps, 1972; Flather, Heaps, 1975; Henry, Heaps, 1976].

Возвышение уровня и составляющие осредненных по вертикали скоростей течений в начальный момент полагались нулевыми. На твердых границах принято условие непротекания, на «жидких» (для Азовского моря – на проходящей через Керченский пролив, а для Белого моря по разрезу Св. Нос – Канин Нос) – условие учета «внешнего» нагона (сформировавшегося соответственно в Чёрном и в Баренцевом морях). При этом как «жидкие», так и твердые границы проводились по u - или v -узлам при их параллельности соответственно оси Y или X .

Коэффициент донного трения по исследованиям в различных морях и у различных авторов варьирует от 10^{-2} до 10^{-3} [Ramming, Kowalik, 1980]. В наших исследованиях для Азовского моря принято r как функция от глубины по аналогии с [Ramming, Kowalik, 1980] в виде:

$$r = \frac{1}{32} \left[\ln \left(\frac{14.8H}{z^*} \right) \right]^{-2}, \quad (11)$$

где H – глубина; $z^* = \Delta h \times 10^{-3}$ – параметр «грубости» сетки; Δh – шаг сетки. Для Белого моря коэффициенты донного трения подбирались посредством модельных расчетов амплитуды приливной волны M_2 , и наименьшее ее отклонение от наблюдаемых величин получалось при значениях коэффициента донного трения, зависящего от глубины в виде формулы (11) для Онежского залива и $r = 1,4 \times 10^{-3}$ для остальной части моря.

Для оценки реакции вод Азовского моря на вынуждающие силы определенной частоты мы выполнили серию расчетов, полагая на открытой границе в Керченском проливе нагоны в виде:

$$\zeta_H(t) = \frac{B}{2} \cos(\sigma t) \quad (12)$$

с периодом волн от 3 до 50 часов с шагом 0,1 часа. В уравнении (12) B – величина нагона, принятая нами при расчетах равной 1,0 м; $\sigma = 2\pi/T$ – угловая скорость, T – период (продолжительность) нагона. Поскольку абсолютное большинство штормовых нагонов из Баренцева в Белое море распространяется в виде волн Кельвина [Инжебейкин, 2003], отклик вод

Белого моря на вынуждающие силы определенной частоты оценивался серией расчетов, задавая на открытой границе нагоны в виде волн Кельвина:

$$\zeta_H(t) = \zeta_{SNH}(t) \exp \left[-\frac{f y}{(g H)^{1/2}} \right] \quad (13)$$

с периодом волн от 3 до 48 часов с шагом 0,1 часа. В уравнении (13) ζ_{SNH} – нагонная составляющая уровней в п. Святой Нос, принятая нами при расчетах равной 1 м (обычной величине входящих из Баренцева моря нагонных волн); y – расстояние по оси ОУ от п. Святой Нос до той или иной точки на открытой границе.

Для оценки реакции вод Азовского и Белого морей на вынуждающие колебания и выделения резонансных частот рассчитывалась и сравнивалась осредненная по времени суммарная энергия осцилляций $E_s = E_k + E_p$. Результаты расчетов колебаний суммарной энергии при различных частотах (периодах) вынуждающей силы приведены на рисунке 2.2. На этом рисунке частоты (периоды) осцилляций отложены вдоль оси X , а вдоль оси Y – значения квадратного корня из величин суммарной энергии. Очевидно, что суммарная энергия будет максимальной при совпадении периодов собственных и вынуждающих колебаний. При этом кинетическая составляющая суммарной энергии рассчитывалась на основании зависимости

$$E_k = \frac{\rho}{2T} \int_T \int_S (h + \zeta) (u^2 + v^2) dS dt, \quad (14)$$

а потенциальная – по выражению

$$E_p = \frac{\rho g}{2T} \int_T \int_S \zeta^2 dS dt, \quad (15)$$

где ρ – плотность морской воды (принятая в модели постоянной и равной 1000 кг/м³), T – период, S – площадь.

В принятой постановке задачи частотные характеристики и пространственная структура (расположение амфидромических систем и изофазы) сейшевых колебаний будут соответствовать их аналогам в «истинных» сейшах, генерируемых атмосферным воздействием. В то же время вносятся определенные ошибки в значения амплитуд в районах, непосредственно примыкающих к «жидкой» границе, вследствие влияния граничных условий. Кроме того, в гипермелководном Азовском

море в его северо-восточной части из-за сильной диссипации волновой энергии при прохождении вынуждающих колебаний от Керченского пролива через мелководные районы моря рассчитанные величины колебаний будут несколько заниженными по сравнению с природными, когда генерация сейшевых колебаний производилась бы изменением полей атмосферного давления или ветра непосредственно над морем. Особенно значимым указанное «занижение» будет для одно- и двухузловой сейш. Поэтому в распределение изоамплитуд в этой части Азовского моря для указанных мод колебаний внесены соответствующие поправки с учетом распределения по районам моря значений энергетического спектра колебаний уровня на данных частотах. Заметим, что для сравнения результатов расчета с натурными данными выполнен спектральный анализ колебаний уровня: для Азовского моря по ежечасным наблюдениям в пунктах Ейск, Приморско-Ахтарск, Геническ, Мариуполь, Таганрог за полугодовой (безледный) период (с апреля по сентябрь 1977 г. включительно) и наблюдениям через каждые 5 минут в п. Кагальник, находящегося в вершине Таганрогского залива (с 19.06 по 14.10.2007); для Белого моря по ежечасным наблюдениям в пункте Сосновец за период с мая по ноябрь 1977 г.

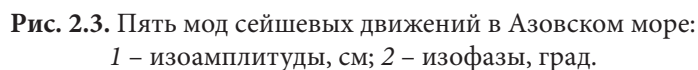
2.1. Азовское море

Колебания на резонансных частотах, соответствующих 1-, 2-, 3-, 4- и 5-узловой сейшам, имеют периоды соответственно 38,4; 23,7; 12,1; 8,8 и 5,1 ч (рис. 2.3). Все выявленные пять мод в спектрах флуктуаций уровня, полученных по наблюдениям в пунктах, расположенных на различных участках побережья моря, обнаруживаются (рис. 2.4), что подтверждает реалистичность полученных результатов. Рассмотрим более подробно вклад сейшевых движений в формирование уровней и течений в Азовском море.

Одноузловая сейша. На рисунке 2.3*b* приведено распределение изоамплитуд и изофаз уровенных вариаций, а на рисунке 2.3*a* – модулей максимальных за период сейши скоростей течений при вынужденных колебаниях на резонансной частоте, соответствующей одноузловой сейше с периодом 38,4 ч. Центр вырожденной амфидромической системы колебаний на этой резонансной частоте расположен на западной части Керченского пролива. Решение для первой моды демонстрирует циклоническое вращение линий изофаз (рис. 2.3*b*). При этом, когда

волна проходит через более мелководную северную часть моря, имеет место уменьшение фазовой скорости, что приводит к формированию «шлейфа» запаздывания изофаз волны (рис. 2.3*b*). При заданных значениях вынуждающих воздействий наибольшие величины колебаний уровня (более 35 см) одноузловая сейша может формировать в вершине Таганрогского залива и у северо-западного побережья моря, в районе п. Игоревка. У западных берегов моря и у побережий восточнее Обиточной косы, а также в средней части Таганрогского залива могут формироваться вариации до 30 см, а на акватории северо-восточнее Бердянской косы – до 25 см. Следует заметить, что вследствие гипермелководности моря при подходе гребня волны одноузловой сейши к далеко выдающимся в море косам на его северо-западном побережье значения осцилляций уровня в тыловой части косы (в кутовой части образуемых косами бухт) оказались на 15–35 % ниже, по сравнению с теми, которые, согласно расчетам, имели место на стороне набегания фронта волны. В Таганрогском заливе в природных условиях, при генерации сейшевых колебаний возмущениями атмосферного давления или ветра непосредственно над акваторией моря, следует ожидать более высокие величины одноузловой сейши и их вклада в формирование экстремальных уровней в этом районе.

Что касается течений при движениях, соответствующих одноузловой сейше, то можно заметить, что главной тенденцией в распределении максимальных за период сейши скоростей является рост их значений по мере приближения к центру амфидромии, где скорости согласно расчетам возрастают до 1–1,3 м/с (рис. 2.5*a*). В восточной половине Казантипского залива (расположенного также относительно близко от центра амфидромии) скорости составили 60–70 см/с, у восточной оконечности мыса перед входом в бухту они возрастали до 2 м/с, а у западного мыса до 1,5 м/с. Расчеты показывают относительно высокие скорости течений у западных (северо-западных) берегов кос: Обиточная – 30–40 см/с (максимум более 60 см/с западнее оконечности косы); Бердянская – 25–30 см/с (максимум до 45 см/с западнее оконечности косы); Белосарайская – 25–30 см/с (максимум до 50 см/с); Кривая – 15–20 см/с (максимум 30 см/с); Беглицкая – 10–20 см/с (максимум 25 см/с); Долгая – 10–15 см/с (максимум более 20 см/с) (рис. 2.5*a*). Существенны рассчитанные при данной моде скорости в проливе перед Утлюкским лиманом (20–30 см/с, максимум западнее оконечности косы Бирючий Остров до 0,5 м/с). Вдоль восточного берега моря скорости



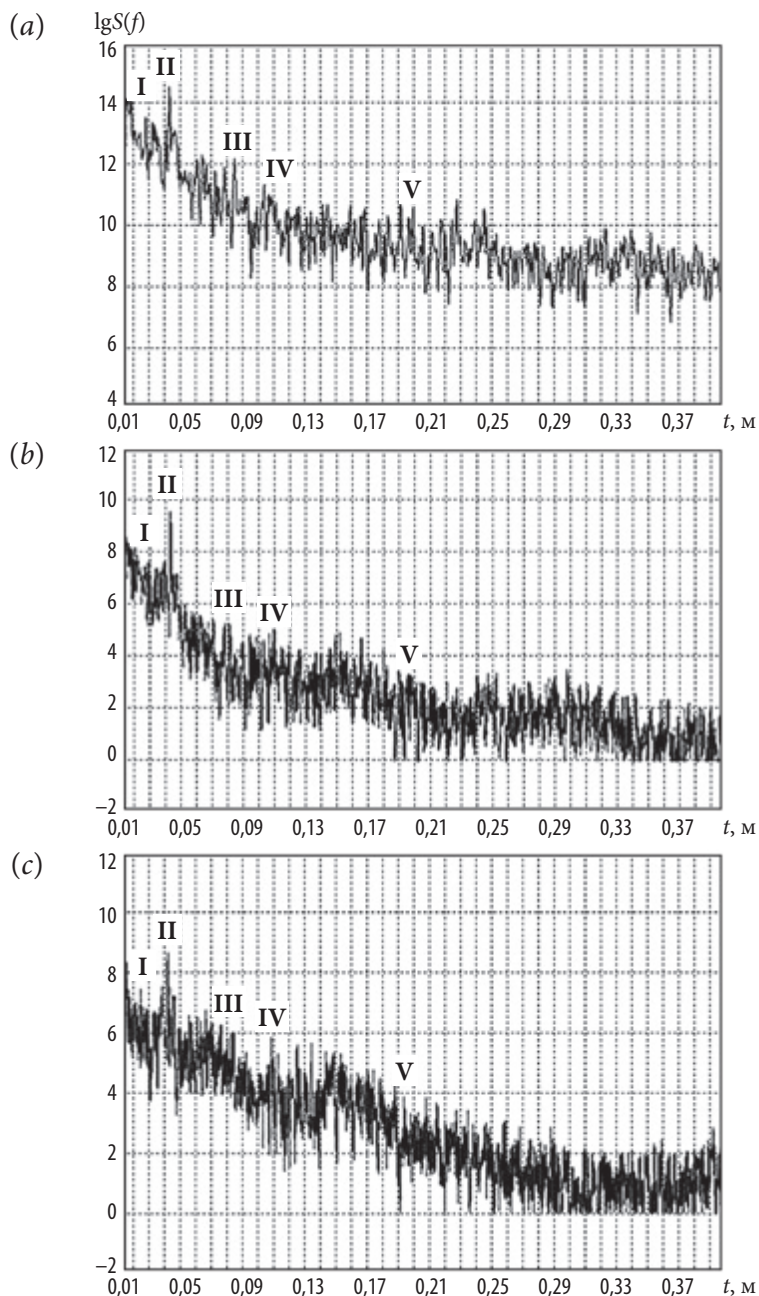
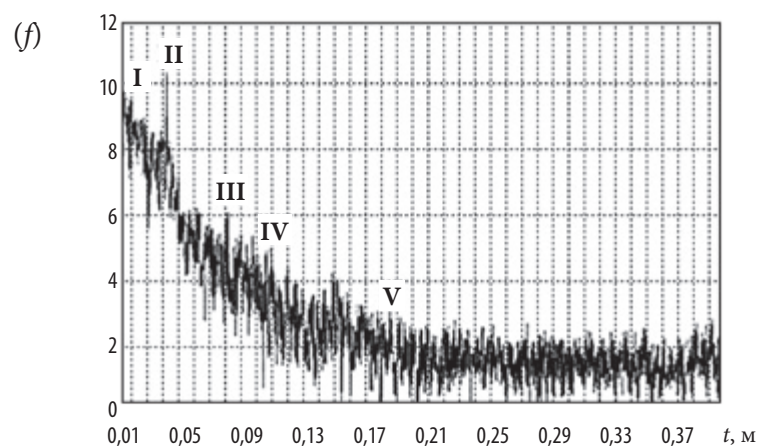
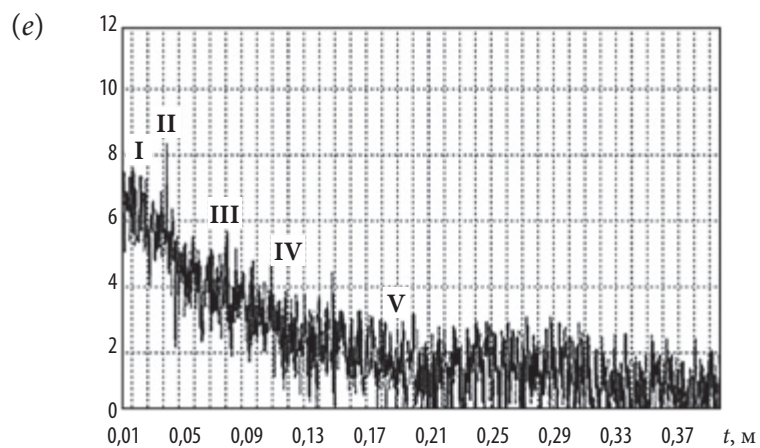
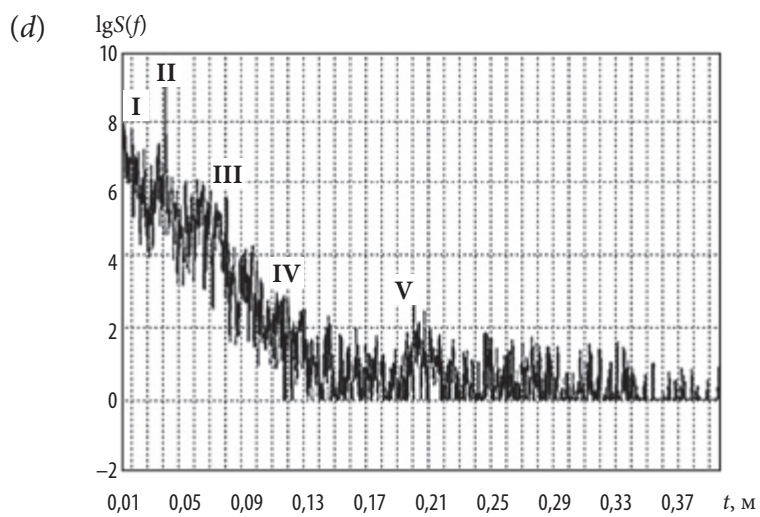
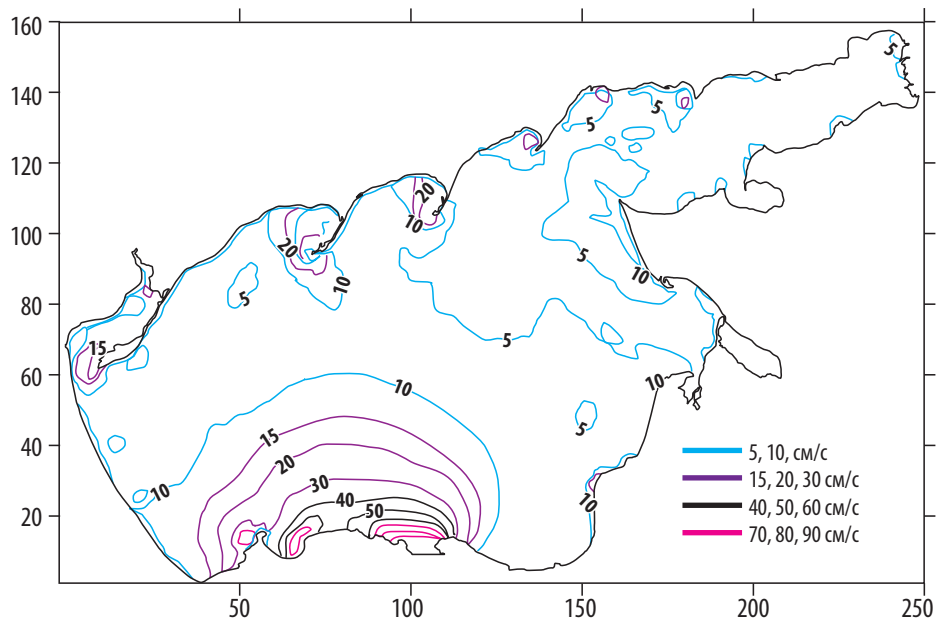
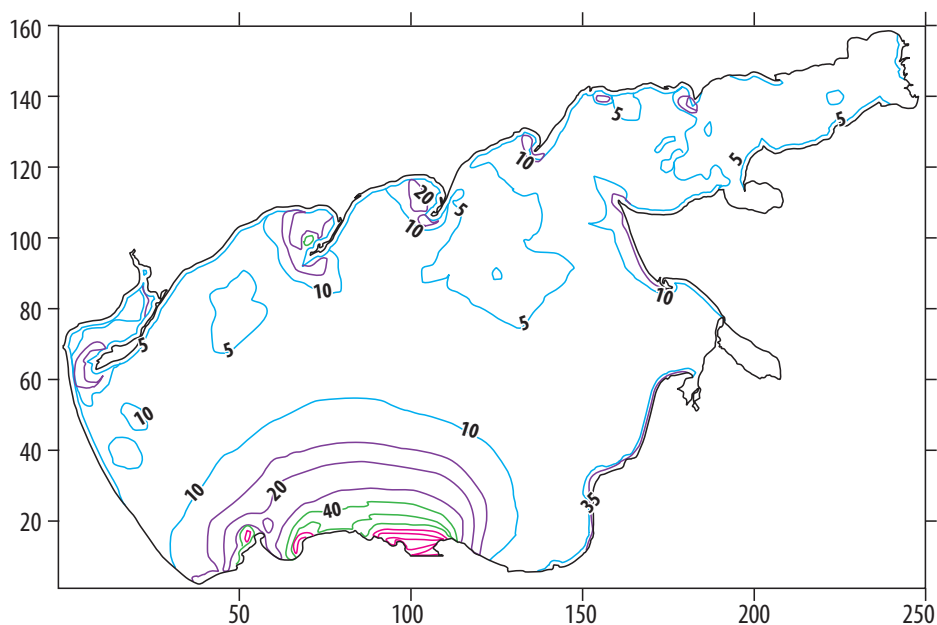


Рис. 2.4. Флуктуации уровня Азовского моря на основании данных с различных участков побережий: Кагальник (а), за период с июня по октябрь 2007 г.; Ейск (b); Приморско-Ахтарск (c); Геническ (d); Мариуполь (e); Таганрог (f) за период с апреля по сентябрь 1977 г. Римскими цифрами обозначены максимальные значения, соответствующие модам сейшевых осцилляций



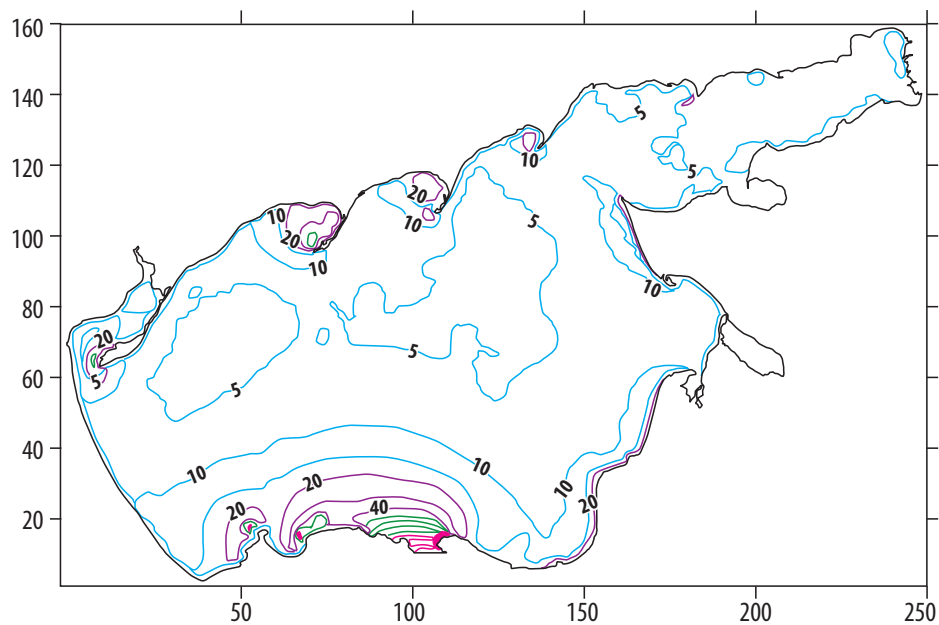


(a)

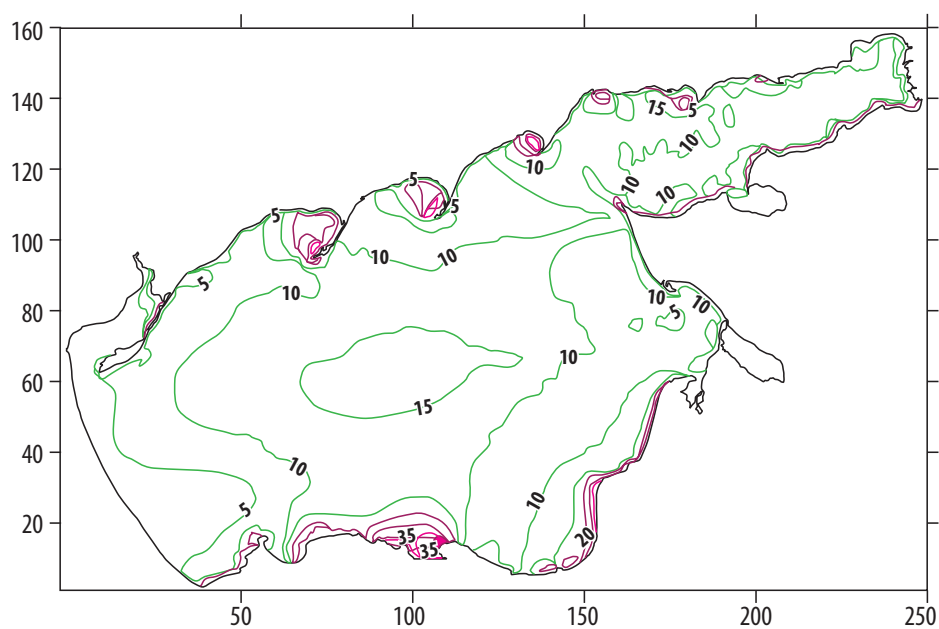


(b)

Рис. 2.5. Закономерное распределение скорости сейш на акватории Азовского моря



(c)



(d)

Двухузловая сейша. При второй моде резонансных колебаний, соответствующих двухузловой сейше с периодом 23,7 ч., узел одной амфидромии, представляющей собой вырожденную амфидромическую систему, расположен в юго-восточной части Азовского моря в районе между устьем Кубани и п. Ачуево (рис. 2.5с). Узловая область второй амфидромии, также являющейся вырожденной амфидромической системой, расположена на крайней западной части моря у косы Арабатская Стрелка. Вращение обеих амфидромических систем имеет циклонический характер; при этом изофазы первой амфидромии в северной мелководной части моря также формируют «шлейф» запаздывания. Наибольшие величины при колебаниях, соответствующих двухузловой сейше, могут иметь место в обширном районе пучности между двумя амфидромиями: 0,5 м в северо-западном направлении от Керченского пролива, а также в вершине Таганрогского залива (более 0,4 м). Заметных величин (15–20 см) вариации уровней могут достичь у северо-западного и северо-восточного побережья моря (рис. 2.5с). В остальных районах моря колебания уровня на этой резонансной частоте незначительны и достигают до 10 см в западной части моря на акватории, прилегающей к косе Арабатская Стрелка, и 4–8 см на акватории вдоль юго-восточного побережья моря.

Максимальные за период сейши скорости течений, возникающие при резонансных движениях воды, соответствующие двухузловой сейше, на акватории вблизи центра первой амфидромии (между устьем Кубани и п. Ачуево) возрастают до 15–20 см/с с максимумом (35 см/с) у мыса юго-западнее п. Ачуево (рис. 2.5b). В районе центра второй амфидромии (на акватории, прилегающей к косе Арабатская Стрелка) скорости составляют 8–10 см/с, увеличиваясь по направлению на ССЗ к Утлюкскому лиману до 15–20 см/с, с максимумом (более 60 см/с) западнее оконечности косы Бирючий Остров. В самом Утлюкском лимане скорости течений при данной моде колебаний согласно расчетам составили 12–15 см/с. Если не считать район вблизи открытой границы, где на рисунке 5b показаны большие скорости, но где возможны большие искажения из-за влияния граничных условий, то наибольшие во всем море величины максимальных скоростей течений для данной моды согласно расчетам имели место в восточной половине Казантипского залива; здесь скорости составляют 50–70 см/с, у восточной оконечности мыса перед входом в бухту возрастают до 1,5–1,7 м/с, а восточнее бухты – до 1,5 м/с (рис. 2.5b). В западной части Казантипского залива скорости составили 0,3–0,7 м/с, а западнее (западного относительно бухты) мыса снова возрастают до 1,5 м/с.

Так как в бухтах, образуемых косами Обиточная, Бердянская, Белосарайская и Кривая, формируются зоны пониженных уровней (по сравнению с уровнями на стороне набегания фронта волны), у западных и северо-западных берегов указанных кос появляются направленные в эти зоны кратковременные течения с повышенными мгновенными скоростями. Максимальные за период сейши скорости у западных берегов этих кос составляют: Обиточная – 30–40 см/с (максимум более 55 см/с западнее оконечности косы); Бердянская – 30–40 см/с (максимум до 75 см/с западнее оконечности косы); Белосарайская – 25–30 см/с (максимум до 55 см/с); Кривая – 15–20 см/с (максимум 35 см/с); Беглицкая – 10–15 см/с (максимум 25 см/с) (рис. 2.5b). В центральной части моря вдали от кос, узостей и центров амфидромий, а также в Таганрогском заливе доминируют скорости 5–10 см/с.

Треузловая сейша. При колебаниях на резонансной частоте, соответствующей треузловой сейше (с периодом 12,1 ч), амфидромические системы расположены: первая – в западной части Таганрогского залива с амфидромической точкой в 8 милях на юго-запад от оконечности косы Кривая, вторая – у северо-восточного берега Крымского полуострова и третья – на западной части моря вблизи Утлюкского лимана (рис. 2.5d). Две последние амфидромии представляют собой вырожденные амфидромические системы. Все три амфидромические системы имеют циклонический характер. Максимальных величин сейшевые вариации при этой моде могут достичь у побережья северо-западнее косы Федотова (до 25–30 см), а у побережья юго-западнее от Бердянска и в обширной зоне пучности в западной части аккумулятивной равнины Панова – более 20 см. В зоне пучности, расположенной в центральной и частично в восточной половине моря, рассчитанные по модели вариации уровня составили 10–16 см (рис. 2.5d). На акваториях, примыкающих к восточному берегу, и в Таганрогском заливе эти величины находились в пределах 4–8 см.

Для этой моды резонансных осцилляций зоны наибольших на акватории моря максимальных за период сейши скоростей также в основном приурочены к центрам амфидромий. В Таганрогском заливе по мере приближения к амфидромической точке в западной части залива скорости возрастают от 3–5 на периферии до 10–15 см/с в центре амфидромии (рис. 2.5c). В узловой зоне второй амфидромической системы (у северо-восточного берега Крымского полуострова) скорости возрастают до 40–70 см/с, а наибольшие значения в районе между бухтой Булганак и мысом Борзовка, у восточного мыса перед входом в Казантипский залив, а

также у западного мыса перед входом этот же залив, соответственно 90, 130 и 125 см/с (рис. 2.5с). В районе центра третьей амфидромии (у входа в Утлюкский лиман) скорости составили 20–40 см/с (максимум – западнее оконечности косы Бирючий Остров – 80 см/с). В самом Утлюкском лимане скорости были в пределах 10–20 см/с (рис. 2.5с).

Весьма значительными для этой моды колебаний оказались максимальные скорости течений в бухтах, образуемых косами Обиточная, Бердянская, Белосарайская и Кривая у своих западных (или северо-западных) берегов. Так, на акваториях западнее этих кос скорости составили: Обиточная – 20–50 см/с (максимум более 70 см/с западнее оконечности косы); Бердянская 20–40 см/с (максимум 90 см/с западнее оконечности косы); Белосарайская 20–40 см/с (максимум 60 см/с); Кривая 10–15 см/с (максимум 35 см/с) (рис. 2.5с). Относительно высокие скорости отмечены также на акватории восточнее (юго-восточнее) Мариуполя, где они составили 15–20 см/с (максимум 50 см/с). Существенные скорости получились вдоль западного (юго-западного) берега косы Долгая (15–20 см/с, максимум более 40 см/с у северо-западной оконечности косы), а также вдоль юго-восточного побережья моря (20–30 см/с, максимум 50 см/с у мыса юго-западнее п. Ачуево). В зонах пучностей, занимающих практически всю центральную часть моря, а также в восточной половине Таганрогского залива максимальные за период 3-узловой сейши скорости течений не превышали 5 см/с. В западной части Таганрогского залива максимальные скорости течений для этой моды составили 5–10 см/с (рис. 2.5с).

Четырехузловая сейша. В случае осцилляций на резонансной частоте, соответствующей 4-узловой сейше с периодом 8,8 ч, все четыре амфидромические системы имеют циклонический характер (рис. 2.3d). Амфидромическая точка первой системы расположена в восточной части моря в 20 милях по направлению на запад-юго-запад от ст. Камышеватская в северной части Ачуевской ложбины. Изоамплитуды в центре данной амфидромии образуют эллипс, как бы зажатый банками: с северо-востока – Ачуевской, а с юго-запада и запада – Железинской. Центры остальных трех амфидромий, представляющих собой вырожденные амфидромические системы, расположены в вершине Таганрогского залива в районе Таганрога, на севере Керченского полуострова в Казантипском заливе и на крайнем западе моря у входа в Утлюкский лиман (рис. 2.3d). На небольшой акватории – в зоне пучности над Железинской банкой – четвертая мода может вызвать колебания более 1,5 м, что является абсолютным максимумом из всех величин, полученных для осцилляций

от первой до пятой моды во всех районах Азовского моря под воздействием заданных на «жидкой» границе возмущений. В зонах пучностей, расположенных на западной границе аккумулятивной равнины Панова (в 10–13 милях восточнее косы Федотова), южнее Бердянской косы, а также на акватории, примыкающей к средней части Арабатской косы, величины вариаций уровня при этой моде могут достигать соответственно 0,7; 0,5 и 0,4 м. В остальных районах моря величины вариаций уровня при четвертой моде невелики и составляют в центральных районах моря менее 0,15, а вдоль восточного побережья моря и в Таганрогском заливе менее 0,1 м (рис. 2.5*d*). Для резонансных движений, соответствующих 4-узловой сейше, тенденция примыкания зон наибольших максимальных за период сейши скоростей течений к центрам амфидромий по всей акватории моря сохраняется. Так, по мере приближения к амфидромической точке на восточной половине моря (в северной части Ачужевской ложбины) скорости увеличиваются от 5–15 на периферии до 50–60 см/с в центре. В районе узла второй амфидромии, на акватории, прилегающей к Казантипскому заливу, и в самой бухте скорости составили 50–70 см/с (максимум 90 см/с западнее западного относительно бухты мыса) и 70–90 см/с восточнее от бухты мыса. На акватории перед входом в Утлюкский лиман, где расположен узел третьей амфидромии, скорости составили 20–50 см/с (максимум более 90 см/с в проливе западнее оконечности косы Бирючий Остров), а в самом Утлюкском лимане скорости находились в пределах 10–20 см/с. И, наконец, на акватории, прилегающей к побережью между Таганрогом и Петрушино, у центра четвертой амфидромической системы, скорости составили 15–20 см/с, хотя на всей остальной части Таганрогского залива максимальные скорости течений для этой моды не превышали 5 см/с. Значительные величины максимальных за период сейши скоростей течений также получены на акваториях западнее косы Обиточная (20–50, максимум 80 см/с); западнее косы Бердянская (10–20, максимум более 50 см/с); западнее косы Белосарайская (15–20, максимум, 40 см/с). На остальной, большей части моря, доминируют скорости 10–15 см/с и лишь в Таганрогском заливе скорости падают до 5 см/с и менее.

Пятиузловая сейша. При колебаниях на резонансной частоте, соответствующей пятиузловой сейше с периодом 5,1 ч, первая амфидромическая система охватывает почти всю глубоководную южную часть моря и имеет циклонический характер (рис. 2.5*e*). Ее центр расположен в западной половине моря. Следующие четыре амфидромии представляют собой вырожденные амфидромические системы. Центр

первой из них расположен у западного основания косы Обиточная (в вершине образуемой косой бухты), амфидромия имеет антициклонический характер (рис. 2.5е). Следующая (третья по счету для данной моды) амфидромическая система вращается вокруг косы Долгая также по часовой стрелке, т.е. имеет антициклонический характер. Четвертая амфидромическая система, также антициклонического характера, вращается вокруг косы Сазальницкая. Последняя (пятая) амфидромическая система (вырожденная) в вершине Таганрогского залива вращается вокруг Таганрогского полуострова (косы) против часовой стрелки, т.е. имеет циклонический характер (рис. 2.3е).

Величины колебаний уровня при пятиузловой сейше могут достигать в Таганрогском заливе и вдоль восточного побережья моря до 0,1 м, у северо-западного побережья моря – 0,4 м, а в районе северо-восточных берегов п-ова Крым превысить – 0,5 м. В зонах пучностей, охватывающих значительную центральную часть моря, величины вариаций уровня могут достичь 15–30 см (рис. 2.3е). Для данной моды колебаний максимальные за период сейши скорости течений увеличиваются от 5–10 на периферии до 15–20 см/с (максимум более 30 см/с) в центре первой амфидромии, охватывающей всю южную часть моря (рис. 2.5е). В зоне узла второй амфидромической системы, у западного берега косы Обиточная, скорости возрастают до 30–50 см/с (максимум – более 70 см/с). В районе центра третьей амфидромической системы у косы Долгая максимальные за период пятиузловой сейши скорости течений составили 20–30 см/с (максимум – 60 см/с). На акватории у косы Сазальницкая, где находится центр четвертой амфидромии, рассчитанные максимальные скорости находились в пределах 20–30 см/с (максимум – 35 см/с).

По мере приближения к центру пятой амфидромической системы на акватории у Таганрога максимальные за период сейши скорости течений возрастали от 5 см/с на периферии до 15 см/с в центре амфидромии (рис. 2.5е). В Таганрогском заливе для данной моды колебаний относительно высокие скорости течений (25 см/с) отмечены на акватории между Чумбурской банкой и Очаковской косой (включая район самой косы), в вершине залива (10–15 см/с), а также в районе п. Порт-Катон, где указанные скорости составили 40–50 см/с (максимум более 70 см/с). У Ейской косы скорости течений составили 30–40 см/с со стороны моря и 5–10 см/с со стороны лимана. В проливе (вход в Ейский лиман) рассматриваемые скорости находились в пределах 10–15 см/с, а в самом лимане на большей его части до 5 см/с (рис. 2.5е).

В устьях и перед мысами максимальные за период сейши скорости течений составили: Бердянской косы 30–40 см/с (максимум 115 см/с); Белосарайской косы 35–45 см/с (максимум более 90 см/с); косы Кривая 25–40 см/с (максимум более 70 см/с), у оконечности косы Бирючий Остров, на входе в Утлюкский лиман, – 16 см/с, хотя буквально на небольшом отдалении от мыса скорости падали до значений менее 5 см/с (рис. 2.5е), а в восточной половине акватории Казантипского залива преобладающими значениями скоростей максимальных за период сейши течений были 15–25 см/с (максимум 90 см/с у мыса перед входом в бухту), а на западной половине – 5–10 см/с. У мыса, находящегося еще немного восточнее от данной бухты, скорости достигали 110 см/с. На самом крайнем юго-западе моря, на участке Керченского берега западнее пункта Каменское, также отмечены относительно высокие скорости, составившие 20–30 см/с (максимум 50 см/с).

В целом сейшевые течения в Азовском море более изменчивы как в пространстве, так и во времени, чем вариации уровня, что заметно по большей «пятнистости» даже при сравнении пространственной изменчивости изоамплитуд колебаний уровня и соответствующих максимальных за период сейши скоростей течений. Это обусловлено тем, что для обеспечения условия неразрывности, скорости течения приходится возрастать при огибании мысов, кос, в проливах и устьях, а также при движении воды с глубоких зон в более мелководные. Полученные результаты также показали, что максимальные скорости течений при сейшах сравнимы и кое-где могут даже превысить максимальные скорости ветровых течений, полученных в работе [Гидрометеорология ... 1991].

2.2. Белое море

Если сравнить характеристики и значимость сейш в Азовском море с их аналогами в Белом море, то в последнем всегда присутствуют приливы и сильные приливные течения. Вот почему сейшевые движения в Белом море не играют такой важной роли для функционирования его экосистемы, как в Азовском море. Исследования сейш здесь важны только для объяснения механизма формирования экстремальных колебаний уровня моря и оценки вклада их в формирование максимальных и минимальных уровней редкой повторяемости. Поэтому для Белого моря мы не будем рассматривать течения, возникающие во время сейшевых колебаний уровня. Расчеты показали, что период первой моды сейшевых колебаний

составляет 35,7 часа. Периоды осцилляций, соответствующих второй, третьей, четвертой и пятой модам, составляют соответственно 18,5; 12,5; 7,5 и 6 часов. Полученные значения подтверждаются спектром колебаний уровня, рассчитанного по наблюдениям за безледный период (с мая по ноябрь включительно) 1977 года (рис. 2.6). Только пик на частоте, соответствующей периоду первой моды в 35,7 часа, выражен слабо, что, по-видимому, обусловлено близостью пункта наблюдений к амфидромической точке одноузловой сейши, где амплитуда колебания уровня наименьшая, или же характером синоптических процессов в период наблюдений. Пик на частоте, соответствующей периоду 24,5 часа, обусловлен наличием одноузловой сейши системы Кандалакшский залив – Горло – Мезенский залив.

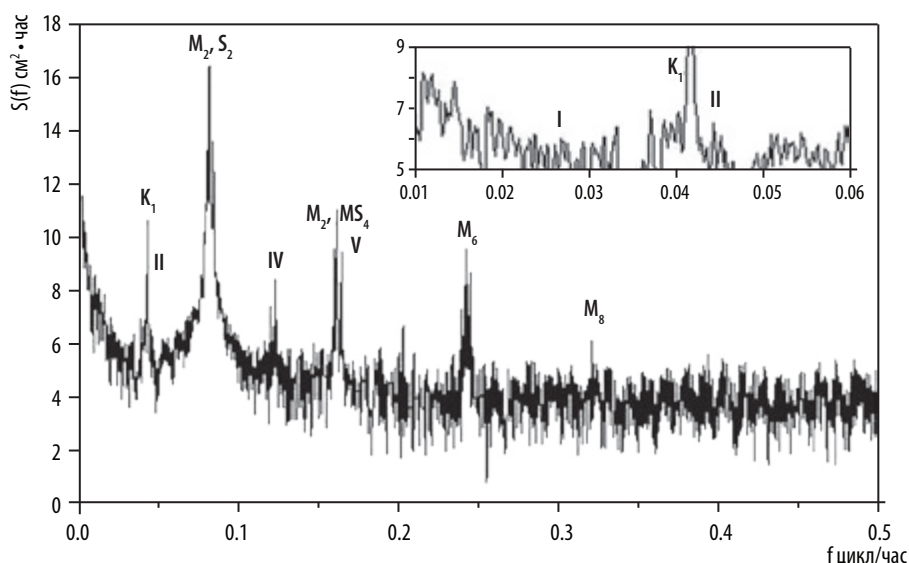


Рис. 2.6. Колебания уровня Белого моря при различных модах сейш

Амфидромическая точка одноузловых колебаний расположена на северо-восточной части Горла посередине линии, соединяющей м. Воронов – м. Данилов. Амфидромическая система имеет циклоническое вращение изофаз. Одноузловая сейша может формировать колебания уровня с максимальными значениями, достигающими 1,25 м в Онежском заливе, 1 м в вершинах Кандалакшского и Двинского заливов и 0,75 м – в вершине Мезенского залива.

Двухузловая сейша имеет период 18,5 ч. Первая амфидромическая точка расположена в восточной части Бассейна близко к границе между

Горлом и Бассейном (рис. 2.7*b*). Вторая амфидромия, представляющая собой вырожденную амфидромическую систему, – на северо-восточной части Воронки, южнее мыса Канин Нос. Обе амфидромические системы имеют циклонический характер. Наибольшие величины осцилляций при двухузловой сейше могут наблюдаться в Мезенском заливе до 55 см, в Воронке и в Онежском заливе – до 25 см, а в Кандалакшском и Двинском заливах – до 15 см.

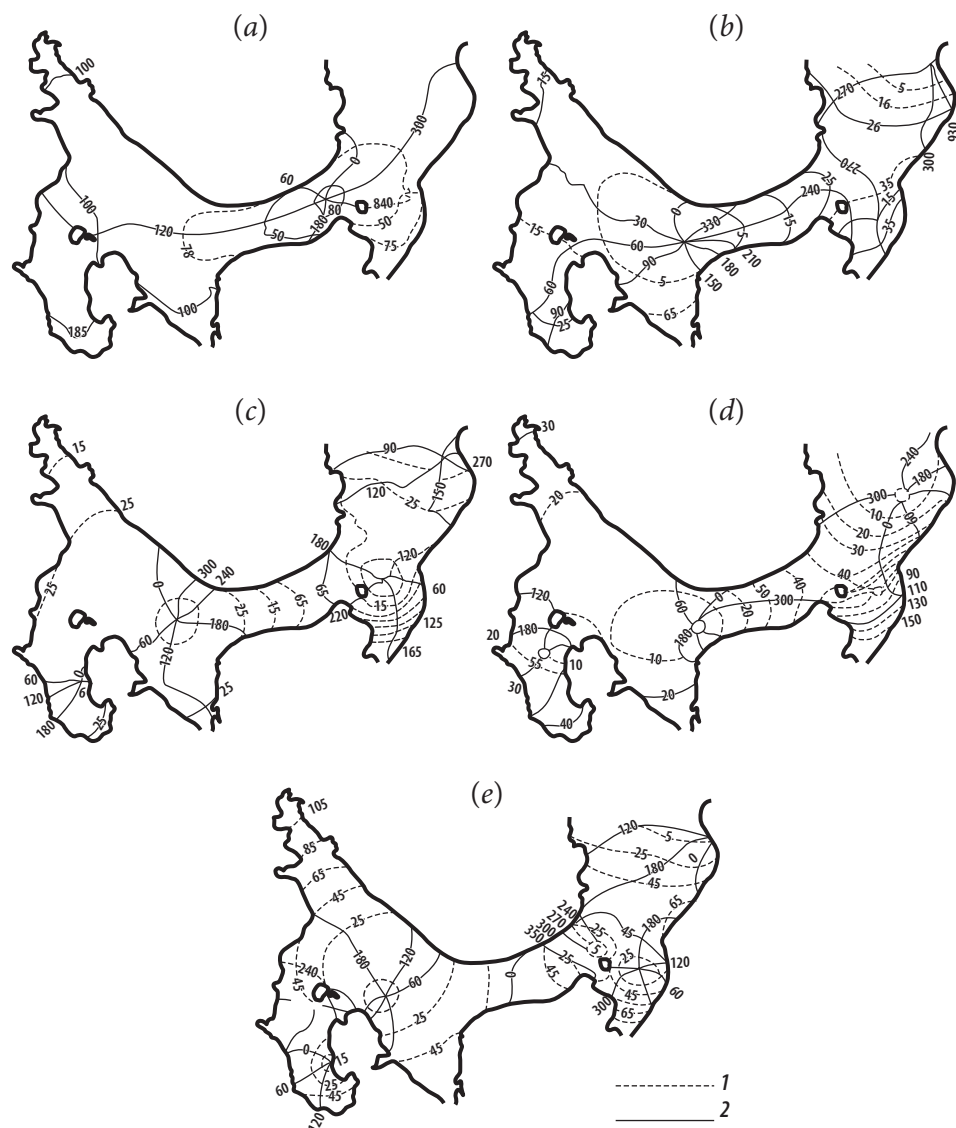


Рис. 2.7. Пять мод сейшевых движений в Белом море

Третья мода сейшевых осцилляций, с периодом 12,5 ч, формирует три амфидромические системы с центрами в восточной части Воронки; в юго-западной части Горла ближе к м. Зимнегорский; вырожденную амфидромическую систему вокруг м. Летний Орлов (рис. 2.7с). Все три амфидромические системы имеют циклонический характер вращения. Сейшевые колебания могут достигать максимальных значений при этой моде в вершине Мезенского залива (до 150 см), затем в Воронке, Горле и Онежском заливе (до 40 см). В Кандалакшском и Двинском заливах они могут достигать 45 и 30 см соответственно.

Все четыре амфидромические системы четырехузловой сейши с периодом осцилляций в 7,5 ч имеют циклонический характер вращения. Центры их расположены: юго-западнее от п-ова Канин; на границе между Воронкой и Мезенским заливом вдоль линии, соединяющей м. Конушин и о-в Моржовец ближе к последнему; в центральной части Бассейна и также в центральной части (ближе к тальвегу) Онежского залива, но ближе к Лямецкому берегу (рис. 2.7d). Следует заметить, что на небольшом по площади районе – в вершине Мезенского залива – при четырехузловой сейше могут возникнуть максимальные в Белом море сейшевые колебания, достигающие выше 160 см, что является абсолютным максимумом сейшевых осцилляций в Белом море от первой до пятой моды. В то же время при этой моде значения сейшевых флуктуаций на остальной части Белого моря невелики, они достигают 65 см в Горле, 45 см в Кандалакшском заливе, 25 см в Воронке, Двинском и Онежском заливах и 10 см в Бассейне (рис. 2.7d).

Период осцилляций при пятой моде составляет 6 ч. Амфидромии имеют циклонический характер вращения и расположены перед входом в Горло на линии, соединяющей м. Данилов и о-в Моржовец; в северной части Мезенского залива; в южной части Бассейна, северо-восточнее о. Жижгин; в южной части Онежского залива ближе к Лямецкому берегу; а также вырожденную амфидромическую систему в северо-восточной части Воронки.

2.3. Сейши как фактор устойчивого функционирования экосистемы Азовского моря

Негативное воздействие сейшевых колебаний на объекты коммунального хозяйства и на навигацию в Белом море почти идентично Азовским. Их наложение на штормовые нагоны может привести к катастрофиче-

ским наводнениям, приводящим к разрушению портовых сооружений, авариям на теплоэлектростанциях и остановке их работы. Соленая морская вода проникает в рукава дельты Северной Двины, из которых происходит забор воды для тепловой станции. Что касается влияния на функционирование экосистемы моря, то тут имеются отличия. Конечно, термохалинная структура вод как Белого, так и Азовского моря имеет важное значение из-за определяющего влияния температуры и солености воды на состояние экосистемы этих морей и на их биопродуктивность. Но при этом важнейшим фактором, влияющим на функционирование экосистемы Азовского моря, является вертикальная стратификация вод, ибо вертикальная устойчивость вод (сформированная распределением температуры или солености) затрудняет вертикальный водообмен и аэрацию нижележащих слоев, способствуя развитию анаэробных процессов. Высокие значения вертикальной устойчивости вод Азовского моря имеют место в основном летом при продолжительных штилях и слабых ветрах [Kaminskii, Fedoseev, 1975]. Анаэробные зоны могут формироваться на значительной части акватории моря площадью до 20 тыс. км², вследствие чего происходит гибель придонных и донных организмов, что может повлиять отрицательно на всю экосистему моря [Курчатова, 1925]. Таким образом, высокая устойчивость элемента системы может привести к неустойчивости самой системы.

Еще одним важным абиотическим фактором как для Белого моря, так и для Азовского является материковый сток. Последний наряду с динамическими процессами влияет на стратификацию вод, но этот показатель для экосистемы Белого моря, ввиду сильных приливных движений в последнем, незначителен в отличие от экосистемы Азовского моря.

Другим абиотическим фактором устойчивости экосистемы Азовского моря являются сейшевые движения. Сейши в Азовском море с относительно небольшим водообменом с Черным морем, приводя в движение всю массу воды водоема, способствуют аэрации придонных вод и сильно влияют на гидрологический и гидрохимический режимы первого и, следовательно, на его экологическое состояние. Основным механизмом такого влияния являются течения, имеющие периодический характер, период которых соответствует периоду сейш. При этом сейшевые течения, резко возрастая в районах узлов и в отдельных прибрежных районах, имеют очень высокие скорости. Таким образом, проявления неустойчивости элементов системы (уровней, течений) повышают устойчивость самой системы. А сейши в бесприливном Азовском море для функционирования

его экосистемы весьма важны и эквивалентны приливным течениям для приливного Белого моря. В Белом море очень сильны приливные течения, и в функционировании экосистемы моря роль сейш незначительна. Они вносят определенный вклад в формирование экстремальных уровней редкой повторяемости и, участвуя в создании опасных наводнений или понижений уровня, могут отрицательно повлиять на состояние ихтиопланктона в зонах нереста рыб.

Таким образом, сейши в Азовском море обеспечивают закон конструктивной эмерджентности систем: система, сложенная из неустойчивых элементов, может оказаться вполне устойчивой.

Итак, на основе сказанного сделаем следующие выводы:

1. Сейшевые колебания могут быть вызваны резким изменением поля ветра или атмосферного давления при быстром перемещении циклонов или антициклонов над соответствующим морем. Другой причиной генерации сейш могут быть волны штормового нагона (сгона), приходящие из смежного моря. Период одноузловой сейши составляет 38,4 ч для Азовского и 35,7 ч для Белого моря.

2. Периоды колебаний, соответствующих 2-, 3-, 4- и 5-узловой сейшам, составляют 23,7; 12,1; 8,8 и 5,1 ч в Азовском и 18,5, 12,5, 7,5 и 6,0 ч в Белом море. Все пять мод идентифицируются в спектрах колебаний уровня, полученных по наблюдениям в период без ледового покрова, подтверждая достоверность полученных результатов. Наибольшие величины осцилляций, соответствующих сейшам от первой до пятой моды, как в Азовском, так и в Белом морях наблюдались при четвертой моде. В Азовском море колебание это в 1,5 м сформировалось в зоне пучности над Железинской банкой. А в Белом море такие осцилляции в 1,6 м имели место в вершине Мезенского залива. Тем не менее на остальной акватории этих морей значения колебаний при четвертой моде были невелики.

3. Сейши в Азовском море сильно влияют на его гидрологический и гидрохимический режимы и, следовательно, на его экологическое состояние, приводя в движение всю водную массу моря. Основным механизмом такого влияния являются течения периодического характера с периодом, соответствующим периоду сейши.

4. На большей части акватории Азовского моря преобладающие значения скоростей максимальных за период сейш течений составили 10–20 см/с. В районах узлов амфидромических систем они увеличиваются до 40–50 см/с, а на оконечностях мысов и в узостях для некоторых мод они возрастают до 90–110 см/с. У мыса перед входом в Казантипский

залив при трехузловой сейше скорости возросли до 130 см/с, а при одноузловой – до 150–200 см/с. Последние значения максимальных за период сейши скоростей оказались самыми высокими во всем море для всех мод. Таким образом, максимальные скорости течения при сейшах сравнимы с максимальными скоростями ветровых течений, а в некоторых местах могут даже превышать их.

5. В Белом море скорости приливных течений варьируют от 0,5 до 2,5 м/с в зависимости от района моря и играют преобладающую роль в вертикальном премешивании вод. Так что в этом отношении значимость сейш в функционировании экосистемы моря невелика. Только в нерестилищах сейшевые колебания уровня моря могут привести к гибели молоди рыб за счет увеличения площадей осушки.

6. В Азовском море из-за гипермелководности бассейна и наличия длинных узких кос суперпозиция подъемов уровня (например, во время нагонов) и сейши может привести к кратковременному катастрофическому затоплению отдельных береговых участков, поскольку это всегда будет сопровождаться чрезвычайно быстрыми течениями в зоне затопления.

Для Азовского моря характерна значительная пространственная неоднородность солёности. На участке от дельты Дона до Керченского пролива солёность возрастает от 0,5–0,7 ‰ до 13–14 ‰. Но самый резкий градиент солёности до 10 ‰ формируется в Таганрогском заливе. Здесь происходит сложное взаимодействие донских речных и трансформированных морских вод. Сокращение стока Дона наряду с интенсивной циклонической деятельностью и аномальной адвекцией черноморских вод привело к тому, что в течение 2014–2016 гг. в Таганрогском заливе наблюдалась высокая солёность (до 12 ‰) [Матишов и др., 2017]. Экстремальные сгоны и нагоны воды на взморье, наблюдающиеся в последние годы, приводят как к обмелению русла Дона, так и к осолонению Таганрогского залива. В то же время под воздействием стока Дона в Таганрогском заливе формируется опресненная водная масса [Матишов и др., 2017]. Для устьевой области Дона характерно сложное сочетание пресных, слабосоленых и соленых вод. Установлено, что в устьевой области даже во время сгонов фиксируется значительное повышение солёности (до 5 ‰) [Матишов и др., 2016; Матишов, Григоренко, 2017].

Предполагаемое увеличение поступления соленой воды из Чёрного моря через Керченский пролив в Азовское море и изменение общего баланса соленых и пресных вод в море приводит к тому, что в отдельные промежутки наблюдается значительное осолонение вод в Таганрогском заливе [Мизюк и др., 2019], а при определенных гидрометеорологических условиях соленые воды проникают даже в устье реки Дон, где находятся водозаборы пресной воды таких крупных городов, как Азов и Таганрог.

Серьезную угрозу представляют экстремальные сгонные явления при восточных и нагонных явлениях при западных ветрах. Особенно опасна ситуация, когда перед нагоном наблюдается сгон воды. Это происходит при резкой смене восточного ветра на западный. При таком стечении обстоя-

тельств затопление происходит быстрее, и оно сильнее по масштабу, чем при постоянно действующим западном ветре. Подобная картина наблюдалась 23 марта 2013 г., когда восточный ветер 3–11 м/с сменился на юго-западный 15 м/с с порывами 20–22 м/с [Матишов и др., 2014]. Во время же экстремального нагона в сентябре 2014 г. наблюдался подъем уровня моря до 2,6 м. Это привело к тому, что вода с повышенной (5–9 ‰) соленостью проникла по Дону до г. Азов, где закачивалась в городской водопровод.

Сотрудниками Южного научного центра РАН регулярно ведутся наблюдения за соленостью и температурой воды как на стационарном автоматическом гидрологическом посту на взморье в 5 км от края дельты (первый створный знак Азово-Донского морского канала (АДМК)), так и в устье Дона (х. Донской, с. Кагальник). Параллельно с этим ведутся наблюдения за метеопараметрами и уровнем воды на гидропосту на х. Донской и уровнемерном посту в г. Таганроге. Весной 2015 г. была создана система из двух постоянно действующих гидропостов, оборудованных датчиками температуры и электропроводности, метеостанцией и уровнемером (рис. 3.1). Передача данных осуществляется в режиме реального времени на сервер ЮНЦ РАН.

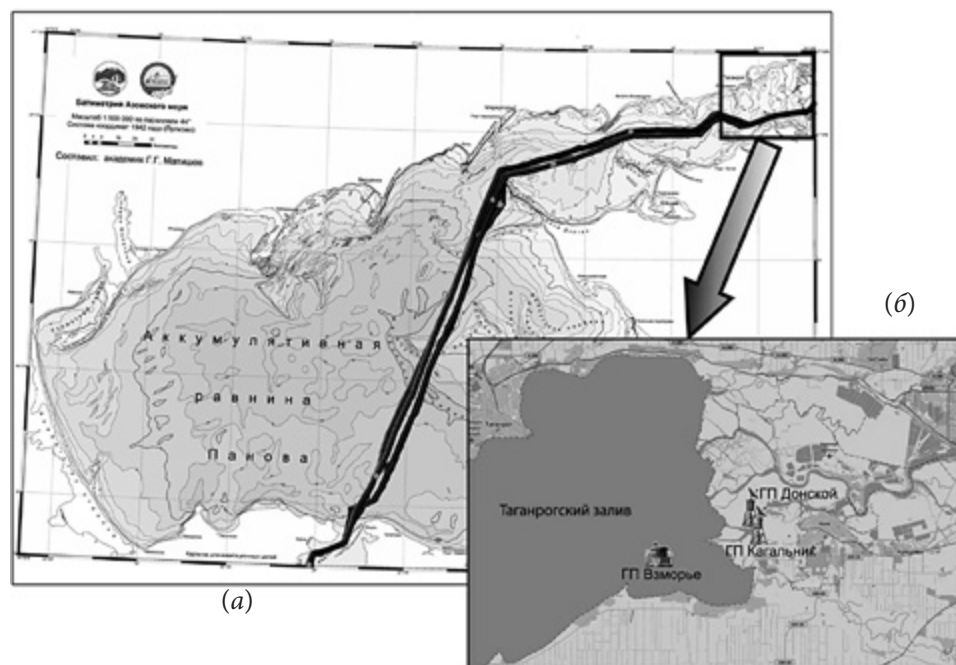


Рис. 3.1. Расположение станций измерения термосолонографа в Азовском море (а), картосхема гидропостов ЮНЦ РАН (б)

Для исследования пространственного распределения температуры и солености морской воды в ходе рейсов научно-исследовательского судна (НИС) «Денеб» в Азовское море и Таганрогский залив проводилась непрерывная запись данных о состоянии среды термосоленографом SBE 21 SEACAT, стандартная траектория движения которого по многолетнему разрезу представлена на рисунке 3.1 жирными линиями.

С помощью указанных измерительных приборов получают данные лишь в одной точке, где эти приборы установлены, а в случае использования термосоленографа – только вдоль линии его следования. Для получения более полной картины распределения солености в Таганрогском заливе были проведены расчеты с помощью двухслойной математической модели [Чикин, Чикина, 2020].

3.1. Математическая модель распределения солености в Таганрогском заливе

Данная модель состоит из двух частей – гидродинамической и транспортной. Суть предлагаемого метода в следующем. Рассмотрим водоем, содержащий как мелководные районы, так и районы с относительно большой глубиной. Исходная трехмерная область моделирования Ω – водная толща водоема – ограничена сверху акваториальной, а снизу донной поверхностями. Для декомпозиции пространственной области моделирования Ω проведем горизонтальную секущую плоскость P , отстоящую от невозмущенной поверхности водоема P_0 на некоторой глубине h_s (рис. 3.2). Глубина верхнего слоя может выбираться из разных соображений. Можно предположить, что глубина мелководья максимальна, либо однородна по глубине протекающих здесь процессов, либо величины сгона и нагона не превосходят глубину верхнего слоя. Таким образом плоскость P разделила исходную область на две подобласти: верхний слой Ω_1 (слой I) – всё мелководье и верхняя часть глубоководного слоя, и глубоководный слой Ω_2 (слой II). Считаем, что слой I достаточно мелкий (значения возможных возмущений уровня воды и глубины слоя близки), а u и v не зависят от Z . Предполагается, что эффект осушения из-за сгона воды может присутствовать только в мелководных районах.

Границы расчетной области Ω могут быть твердыми $\partial\Omega_T$ (донная поверхность, переходящая в береговую линию), участками втекания или вытекания воды $\partial\Omega_R$, свободной поверхностью $\partial\Omega_S$.

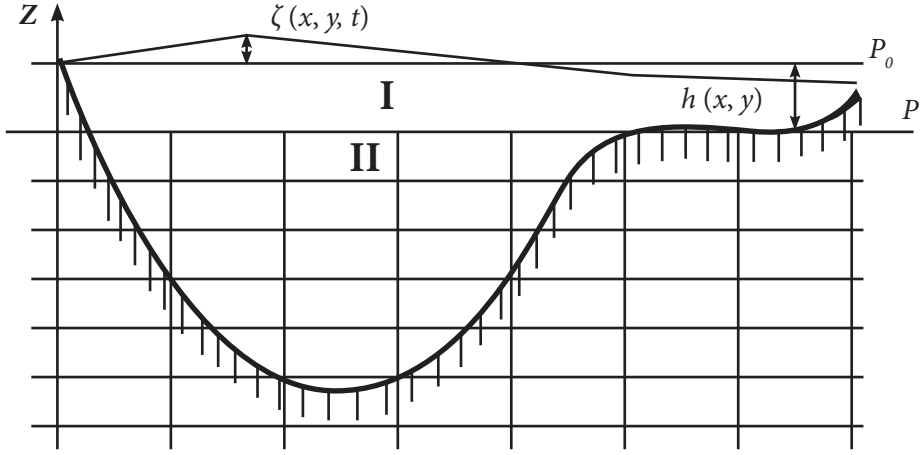


Рис. 3.2. Вертикальный разрез исследуемого модельного водоема

Описание гидродинамической составляющей модели, ее калибровка и результаты счета достаточно подробно даны в [Дацук и др., 2014]. Здесь приводятся лишь основные уравнения.

Движение воды в слое I описывается уравнениями мелкой воды:

$$\frac{du_s}{dt} - \Omega v_s = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \nu_{xy} \left(\frac{\partial^2 u_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_s}{\partial y^2} \right) + \frac{\tau_{sx}}{H} - \frac{\tau_{bx}}{H}, \quad (1)$$

$$\frac{dv_s}{dt} + \Omega u_s = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \nu_{xy} \left(\frac{\partial^2 v_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_s}{\partial y^2} \right) + \frac{\tau_{sy}}{H} - \frac{\tau_{by}}{H}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial H u_s}{\partial x} + \frac{\partial H v_s}{\partial y} = 0. \quad (3)$$

Здесь $H = h + \zeta$; $h = h(x, y)$ – глубина мелководного слоя; $u_s = u_s(x, y, t)$, $v_s = v_s(x, y, t)$ – скорости в слое I; $\zeta = \zeta(x, y, t)$ – возмущение уровня воды; Ω – коэффициент Кориолиса; τ_{sx} , τ_{sy} – проекции на оси OX и OY силы трения ветра о поверхность водоема; τ_{bx} , τ_{by} – проекции на оси OX и OY силы трения жидкости о дно. Эти величины зависят от скорости ветра $\vec{W}_B = \{W_x, W_y\}$ и течения $\vec{W}_T = \{u_s, v_s\}$ и определяются так [Филиппов, 1970]:

$$\bar{\tau}_s = \gamma |\vec{W}_B| \vec{W}_B, \quad \bar{\tau}_b = \beta |\vec{W}_T| \vec{W}_T, \quad (4)$$

где β – коэффициент трения верхнего слоя жидкости о дно; γ – коэффициент трения ветра о слой I.

Движение воды в глубоководном слое II описывается системой, состоящей из уравнений количества движения, уравнения неразрывности среды и уравнения гидростатического давления:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - \Omega v = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu_{xy} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_z(z) \frac{\partial u}{\partial z} \right), \quad (5)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + \Omega u = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu_{xy} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_z(z) \frac{\partial v}{\partial z} \right), \quad (6)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (7)$$

$$p = g\rho(\xi - z) + p_a. \quad (8)$$

Здесь $u = u(x, y, z, t)$, $v = v(x, y, z, t)$, $w = w(x, y, z, t)$ – компоненты вектора скорости; $p(x, y, z, t)$ – давление; x, y, z, t – пространственные переменные и время соответственно; $p_a = p_a(x, y)$ – атмосферное давление; $\nu_{xy}, \nu_z(z)$ – коэффициенты горизонтальной и вертикальной вязкости соответственно; ρ – плотность воды; $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – ускорение силы тяжести.

Граничные условия на твердой границе $\partial\Omega$ задаются условиями скольжения:

$$\mathbf{V}_n|_{\partial\Omega} = 0, \quad \frac{\partial \mathbf{V}_\tau}{\partial \bar{n}} \Big|_{\partial\Omega} = 0,$$

где $\mathbf{V}_n$ – нормальная составляющая вектора скорости, $\mathbf{V}_\tau$ – касательная составляющая вектора скорости. В местах втекания или вытекания воды $\partial\Omega_R$ задаются соответствующие значения скоростей:

$$u|_{\partial\Omega_r} = u_1, v|_{\partial\Omega_r} = v_1, u_s|_{\partial\Omega_r} = u_{s1}, v_s|_{\partial\Omega_r} = v_{s1}.$$

На границе между слоями $\partial\Omega_l$ ставится условие равенства скоростей:

$$u|_{\partial\Omega_l} = u_s, v|_{\partial\Omega_l} = v_s,$$

и коэффициент β в (4) между слоями равен нулю.

В качестве начальных данных можно задавать известное распределение скоростей и уровня воды:

$$u|_{t=0} = u^0, u_s|_{t=0} = u_s^0, v|_{t=0} = v^0, v_s|_{t=0} = v_s^0, w|_{t=0} = w^0, \xi|_{t=0} = \xi^0$$

или считать эти значения нулевыми.

Данная модель гидродинамики хорошо себя зарекомендовала при расчете течений в Керченском проливе [Матишов, Чикин, 2012], Цимлянском водохранилище [Чикин, Чикина, 2018], а также при вычислениях параметров экстремальных нагонов в Таганрогском заливе [Дацюк и др., 2014].

Транспортная составляющая комплексной двухслойной модели описывается уравнением конвекции-диффузии. Данное уравнение описывает не только распространение концентрации соли. В общем случае оно используется при описании процессов поступления взвешенного вещества, а также взмучивания [Чикин, Чикина, 2020].

Для верхнего слоя I в общем случае уравнение имеет вид

$$\frac{\partial c_s}{\partial t} + \frac{\partial(uc_s)}{\partial x} + \frac{\partial(vc_s)}{\partial y} = \varepsilon_{xy} \left(\frac{\partial^2 c_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c_s}{\partial y^2} \right) + Q + \frac{E_b - D_b}{H} + \frac{w(-h_s) - w_s}{H} c_s. \quad (9)$$

Для нижнего слоя II уравнение имеет вид

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial(uc)}{\partial x} + \frac{\partial(vc)}{\partial y} + \frac{\partial((w - w_s)c)}{\partial z} = \varepsilon_{xy} \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_z(z) \frac{\partial c}{\partial z} \right) + Q. \quad (10)$$

В уравнениях (9) и (10) c_s – концентрация в слое I; c – концентрация в слое II; u, v, w – компоненты скорости; w_s – скорость оседания взвеси (если рассматривается процесс взмучивания); $\varepsilon_{xy}, \varepsilon_z(z)$ – коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентной диффузии соответственно; $Q(x, y, z, t)$ – источниковый член, например работа земснаряда или сваливание извлеченного грунта. В районах мелководья поток взвеси q_b через донную поверхность за счет оседания и размывания вычисляется как $q_b = E_b - D_b$, где E_b – расход при размывании, D_b – расход оседающих частиц.

При моделировании распределения концентрации соли в Таганрогском заливе предполагалось, что источниковые члены отсутствуют. В этом случае уравнения (9) и (10) принимают более простой вид

$$\frac{\partial c_s}{\partial t} + \frac{\partial(uc_s)}{\partial x} + \frac{\partial(vc_s)}{\partial y} = \varepsilon_{xy} \left(\frac{\partial^2 c_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c_s}{\partial y^2} \right). \quad (11)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial(uc)}{\partial x} + \frac{\partial(vc)}{\partial y} + \frac{\partial((w - w_s)c)}{\partial z} = \varepsilon_{xy} \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_z(z) \frac{\partial c}{\partial z} \right). \quad (12)$$

Граничные условия ставим следующим образом.

Для верхнего и нижнего слоев на твердой боковой границе ставятся условия

$$\frac{\partial c_s}{\partial \bar{n}} = \frac{\partial c}{\partial \bar{n}} = 0,$$

где $\bar{n}$ – нормаль к боковой границе. Для нижнего слоя ставится дополнительное условие $c = c_s$ – равенство концентраций между слоями.

В качестве начальных данных берется какое-либо известное распределение концентрации соли (возможно, интерполяцией наблюдаемых значений).

3.2. Математическая модель поступления соленой воды в дельту Дона

Рассматривается дельтовая область Дона от станицы Раздорской до Таганрогского залива, состоящая из основного русла Дона и его основных рукавов: Старый Дон, Большая Каланча, переходящая в Мокрую Каланчу и Большую Кутерьму. Дельта Дона представляет собой граф из пяти ребер, соответствующих участкам открытых русел, и шести вершин, четыре из которых соответствуют концевым узлам, а две – узлам разветвлений (рис. 3.3).

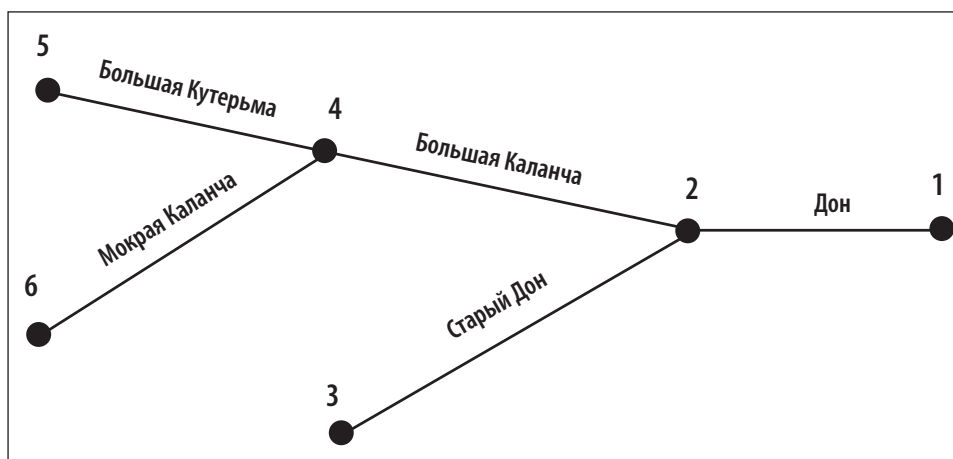


Рис. 3.3. Граф схемы дельты р. Дон

Математическая модель состоит из гидродинамической и транспортной составляющих. Движение воды в открытом русле без распределенного бокового притока задается следующей системой дифференциальных уравнений [Грушевский, 1969; Корень, 1991]:

$$\begin{cases} \frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\frac{Q^2}{W} \right)}{\partial x} + gW \left(\frac{\partial z}{\partial x} + \frac{Q|Q|}{K^2} \right) = 0, \end{cases} \quad (13)$$

где x – координата; t – время; Q – расход воды; z – уровень воды; W – площадь поперечного сечения; K – модуль расхода; g – ускорение свободного падения. Модуль расхода K вычисляется по формуле $K = W \times C\sqrt{R}$, здесь R – гидравлический радиус; C – коэффициент Шези, найденный по формуле Маннинга $C = R^{1/6}/n$, n – шероховатость дна.

В случае когда поперечное сечение русла имеет параболический профиль, систему (13) можно переписать в виде:

$$\begin{cases} \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + gW \frac{\partial z}{\partial x} + v \frac{\partial Q}{\partial x} = -Q \frac{\partial v}{\partial x} - gW \frac{Q|Q|}{K^2}, \end{cases} \quad (14)$$

где B – ширина русла, м. Здесь воспользовались тем, что $\frac{Q}{W} = v$ – скорости течения.

Систему (14) запишем в характеристическом виде:

$$\begin{cases} \frac{gW}{\lambda_1} \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial t} + gW \frac{\partial z}{\partial x} + \lambda_1 \frac{\partial Q}{\partial x} = \varphi, \\ \frac{gW}{\lambda_2} \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial t} + gW \frac{\partial z}{\partial x} + \lambda_2 \frac{\partial Q}{\partial x} = \varphi, \end{cases} \quad (15)$$

где $\lambda_1 = \frac{v + \sqrt{v^2 + 4c^2}}{2}$, $\lambda_2 = \frac{v - \sqrt{v^2 + 4c^2}}{2}$, $\varphi = -Q \frac{\partial v}{\partial x} - gW \frac{Q|Q|}{K^2}$.

Граничные условия задаются следующим образом. В начальной точке основного русла задается расход поступающей воды $Q_0(0, t)$, в точках, соответствующих устьям рукавов в Таганрогском заливе, X_k задается уровень в принимающем водоеме $z_k(X_k, t)$. В узлах ветвления граничные условия задаются следующим образом: сумма притоков-оттоков равна нулю $\sum Q_i = 0$ (i – число рукавов, приходящих в узел разветвления), а уровни водной поверхности равны между собой $z_i = z_*$.

В качестве начального значения можно брать какое-либо ранее известное распределение расхода и уровня водной поверхности, например при нулевом уровне в принимающем водоеме и среднем расходе воды:

$$Q(x, 0) = Q_0(x), \quad z(x, 0) = z_0(x). \quad (16)$$

Транспортная составляющая консервативного вещества описывается уравнением переноса:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + v \frac{\partial C}{\partial x} - \mu \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = 0, \quad (17)$$

где C – концентрация; v – скорость движения воды в русле; μ – коэффициент вязкости.

На концах рукавов граничные условия задаются в зависимости от знака скорости течения. В случае поступления воды в рукав задается условие

$$\frac{\partial C}{\partial x} = \frac{v}{\mu} (C - C^*), \quad (18)$$

где C^* – значение концентрации соли на конце рукава. В случае, когда вода покидает рукав, ставится условие

$$\frac{\partial C}{\partial x} + C \frac{v}{\mu} = 0, \quad (18a)$$

которое соответствует удалению соли из рукава.

Так, во время сильных нагонов на границе рукавов, совпадающих с устьями в Таганрогском заливе, ставится условие

$$\frac{\partial C}{\partial x} = \frac{v}{\mu} (C - C_{zal}),$$

где C_{zal} – значение концентрации соли в Таганрогском заливе. В случае, когда конец рукава содержит сосредоточенные параметры, в частности концентрацию, C_{zal} надо заменить на C^* – концентрацию в точке ветвления, которая вычисляется следующим образом:

$$C^* = \frac{\sum C_i Q_i}{\sum Q_i}.$$

Суммирование проводится только по втекающим в точку ветвления рукавам.

Приведем конечно-разностную аппроксимацию системы (3) на произвольном отрезке, соответствующем отдельному открытому руслу (рис. 3.4). Разобьем отрезок на $M + 2$ узлов с шагом $\Delta = x_{j+1} - x_j$, $j = 1, 3, \dots, M$ (число M для каждого отрезка может быть различным). Шаг по времени обозначим через τ .

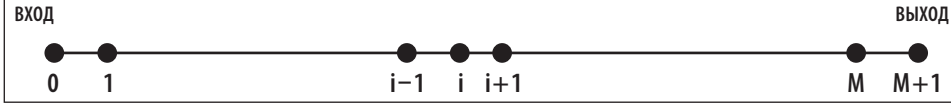


Рис. 3.4. Конечно-разностная сетка для отдельного русла

При аппроксимации во внутренних точках отрезков разностный аналог системы (15) имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{gW_j^n}{\lambda_1 \tau} (z_j^{n+1} - z_j^n) + \frac{1}{\tau} (Q_j^{n+1} - Q_j^n) + \frac{gW_j^n}{\Delta} (z_j^{n+1} - z_{j-1}^{n+1}) + \frac{\lambda_1}{\Delta} (Q_j^{n+1} - Q_{j-1}^{n+1}) = \\ \quad = - \left(gW_j^n \frac{|Q_j^n|}{K^2} + \frac{v_j^n - v_{j-1}^n}{\Delta} \right) Q_j^{n+1}, \\ \frac{gW_j^n}{\lambda_2 \tau} (z_j^{n+1} - z_j^n) + \frac{1}{\tau} (Q_j^{n+1} - Q_j^n) + \frac{gW_j^n}{\Delta} (z_{j+1}^{n+1} - z_j^{n+1}) + \frac{\lambda_2}{\Delta} (Q_{j+1}^{n+1} - Q_j^{n+1}) = \\ \quad = - \left(gW_j^n \frac{|Q_j^n|}{K^2} + \frac{v_{j+1}^n - v_j^n}{\Delta} \right) Q_j^{n+1}. \end{array} \right. \quad (19)$$

Систему (19) представим в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} l_1 z_{j-1} + l_2 Q_{j-1} + l_3 z_j + l_4 Q_j = f_j^n, \\ m_3 z_j + m_4 Q_j + m_5 z_{j+1} + m_6 Q_{j+1} = g_j^n, \end{array} \right. \quad (20)$$

где

$$\begin{aligned} l_1 &= -\frac{gW_j^n}{\Delta}; l_2 = -\frac{\lambda_1}{\Delta}; l_3 = \frac{gW_j^n}{C^+ \tau} + \frac{gW_j^n}{\Delta}; l_4 = \frac{1}{\tau} + \frac{\lambda_1}{\Delta} + \frac{gW_j^n |Q_j^n|}{K^2} + \frac{v_j^n - v_{j-1}^n}{\Delta}; \\ f_j^n &= \frac{gW_j^n}{\lambda_1 \tau} z_j^n + \frac{Q_j^n}{\tau}; \\ m_3 &= \frac{gW_j^n}{\lambda_2 \tau} - \frac{gW_j^n}{\Delta}; m_4 = \frac{1}{\tau} - \frac{\lambda_2}{\Delta} + \frac{gW_j^n |Q_j^n|}{K^2} + \frac{v_{j+1}^n - v_j^n}{\Delta}; m_5 = \frac{gW_j^n}{\Delta}; m_6 = \frac{C^-}{\Delta}; \\ g_j^n &= \frac{gW_j^n}{\lambda_2 \tau} z_j^n + \frac{Q_j^n}{\tau}. \end{aligned}$$

При аппроксимации на левом конце каждого отрезка ($j = 0$ – его начало) берем второе уравнение из (19)

$$\begin{aligned} \frac{gW_0^n}{\lambda_2 \tau} (z_0^{n+1} - z_0^n) + \frac{1}{\tau} (Q_0^{n+1} - Q_0^n) + \frac{gW_1^n}{\Delta} (z_1^{n+1} - z_0^{n+1}) + \frac{\lambda_2}{\Delta} (Q_1^{n+1} - Q_0^{n+1}) = \\ = - \left(gW_0^n \frac{|Q_0^n|}{K^2} + \frac{v_1^n - v_0^n}{\Delta} \right) Q_0^{n+1}. \end{aligned}$$

При аппроксимации на правом конце каждого отрезка ($j = M + 1$ – его конец) берем первое уравнение из (19)

$$\begin{aligned} \frac{gW_{M+1}^n}{\lambda_1 \tau} (z_{M+1}^{n+1} - z_{M+1}^n) + \frac{1}{\tau} (Q_{M+1}^{n+1} - Q_{M+1}^n) + \frac{gW_{M+1}^n}{\Delta} (z_{M+1}^{n+1} - z_M^{n+1}) + \frac{\lambda_1}{\Delta} (Q_{M+1}^{n+1} - Q_M^{n+1}) = \\ = - \left(gW_{M+1}^n \frac{|Q_{M+1}^n|}{K^2} + \frac{v_{M+1}^n - v_M^n}{\Delta} \right) Q_{M+1}^{n+1}. \end{aligned}$$

Конечно-разностная аппроксимация уравнения (17) на равномерной сетке имеет вид

$$\frac{\delta C}{\delta t} + v \frac{\delta C}{\delta x} - \mu \frac{\delta^2 C}{\delta x^2} = 0, \quad (21)$$

а общий вид разностного уравнения для внутренних точек следующий:

$$a_1 C_{j-1} + a_2 C_j + a_3 C_{j+1} = f_j, \quad j = 1, 2, \dots, M. \quad (21 \text{ а})$$

В уравнении (21) разности представлены следующим образом:

$$\frac{\delta C}{\delta t} = \frac{C_j^{n+1} - C_j^n}{\Delta t}, \quad \frac{\delta^2 C}{\delta x^2} = \frac{C_{j+1}^{n+1} - 2C_j^{n+1} + C_{j-1}^{n+1}}{\Delta x^2}.$$

Коэффициенты a_1, a_2, a_3 , а также правая часть f_j без учета конвективной составляющей имеют вид

$$a_1 = -\frac{\mu}{\Delta x^2} \Delta t,$$

$$a_2 = 1 + \frac{2\mu}{\Delta x^2} \Delta t,$$

$$a_3 = -\frac{\mu}{\Delta x^2} \Delta t,$$

$$f_j = c_j^n.$$

К коэффициентам a_1, a_2, a_3 добавляются слагаемые, полученные из аппроксимации конвективной составляющей, которая аппроксимируется второй противопотоковой схемой [Роуч, 1980]:

$$u \frac{\delta C}{\delta x} = \frac{u_R C_R - u_L C_L}{\Delta x}, \text{ где } u_R = \frac{u_{j+1}^{n+1} + u_j^{n+1}}{2}; u_L = \frac{u_{j-1}^{n+1} + u_j^{n+1}}{2},$$

$$C_R = \begin{cases} C_j^{n+1}, & u_R > 0 \\ C_{j+1}^{n+1}, & u_R < 0 \end{cases}, C_L = \begin{cases} C_{j-1}^{n+1}, & u_L > 0 \\ C_j^{n+1}, & u_L < 0 \end{cases}.$$

На левом конце каждого отрезка ($j = 0$ – его начало) в зависимости от знака скорости U_L аппроксимация граничного условия будет следующей:

$$\begin{aligned} \frac{C_1^{n+1} - C_0^{n+1}}{\Delta x} - \frac{u_L}{\mu} C_0 &= -\frac{u_L}{\mu} C^*, (u_L > 0), \\ \frac{C_1^{n+1} - C_0^{n+1}}{\Delta x} + \frac{u_L}{\mu} C_0 &= 0, (u_L < 0) \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} C_0 &= \frac{1}{1 + \frac{u_L}{\mu} \Delta x} C_1 + \frac{\frac{u_L}{\mu} \Delta x C^*}{1 + \frac{u_L}{\mu} \Delta x}, (u_L > 0), \\ C_0 &= \frac{1}{1 - \frac{u_L}{\mu} \Delta x} C_1, (u_L < 0). \end{aligned} \tag{22}$$

На правом конце ребра ($j = M + 1$ – его конец) в зависимости от знака скорости U_R аппроксимация граничного условия будет следующей:

$$\begin{aligned} \frac{C_{M+1}^{n+1} - C_M^{n+1}}{\Delta x} - \frac{u_R}{\mu} C_{M+1} &= -\frac{u_R}{\mu} C_{zal}, (u_R < 0), \\ \frac{C_{M+1}^{n+1} - C_M^{n+1}}{\Delta x} + \frac{u_R}{\mu} C_{M+1} &= 0, (u_R > 0) \end{aligned} \tag{23}$$

или

$$C_{M+1} = \frac{1}{1 - \frac{u_R}{\mu} \Delta x} C_M - \frac{\frac{u_R}{\mu} \Delta x C_{zal}}{1 - \frac{u_R}{\mu} \Delta x}, (u_R < 0),$$

$$C_{M+1} = \frac{1}{1 + \frac{u_R}{\mu} \Delta x} C_M, (u_R > 0).$$
(23)

При конечно-разностной аппроксимации всей области расчета нумерация узлов сетки ведется сквозным образом по всем отрезкам, и для каждого отрезка в системе (20) или уравнении (21а) будет свой индекс j .

3.3. Численное исследование пространственного распределения соленых вод в Таганрогском заливе

Одной из целей данной работы было проведение численного исследования пространственного распределения соленых вод в Таганрогском заливе и расчет динамики изменения концентрации соли в районе дельты Дона. Поэтому, чтобы не ставить граничные условия на открытой границе Таганрогского залива в районе Должанской косы, расчет проводился по всему Азовскому морю, где граничные условия ставятся достаточно легко. В качестве начального распределения концентрации использовался профиль солености, полученный с помощью термосолонографа SBE 21 SEACAT, а в случае отсутствия таких данных – соответствующее поле солености на данное время года [Climatic Atlas ... 2006]. Калибровка модели проводилась по данным наблюдений за несколькими нагонами в различные сезоны года, при этом корректировка гидродинамической составляющей была возможна только по уровню воды.

В рамках предложенной ранее новой классификации гидрологических обстановок на устьевом взморье [Матишов и др., 2017] можно выделить два укрупненных класса ситуаций. Первый характеризуется практически линейной связью между уровнем и соленостью в пределах устьевого взморья и дельты Дона. Замечено, что только при сильных нагонах изменение солености связано прямой зависимостью с изменением уровня воды, что объясняется конвективной составляющей в процессе переноса. Второй класс ситуаций формируется при умеренных ветрах

западных румбов, когда даже значительное увеличение уровня не влияет на изменение солёности. Это явление хорошо иллюстрируется на рисунке 3.5, где виден обоюдный всплеск уровня и солёности, который обусловлен резким увеличением скорости западного ветра до 10–11 м/с. В остальное время, когда скорость ветра не превышала 7–8 м/с, солёность практически не изменяется, хотя наблюдаются достаточно большие колебания уровня.

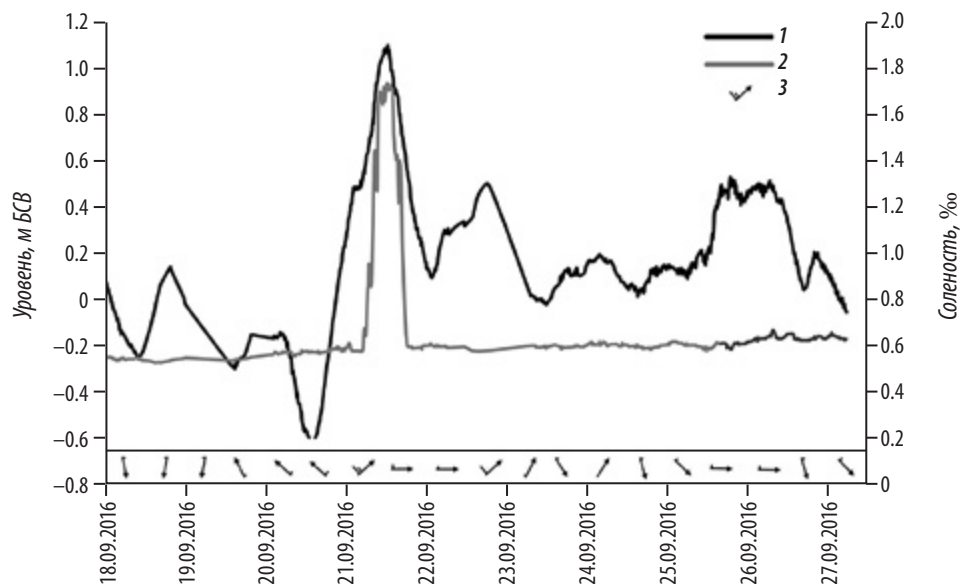


Рис. 3.5. Ход уровня воды (1) и солёности (2) во время нагона 23–27 сентября 2016 г.

Анализ хода уровня и солёности на устьевом взморье и в гирле Свиное на расстоянии 5 км от устья позволил выявить некоторую инертность в процессе переноса солёных водных масс, которая иллюстрируется «раздвоением» данных уровня и солёности на диаграмме рассеивания, где одним и тем же уровням воды соответствуют меньшие и большие величины значения солёности. Меньшая солёность соответствует, как правило, подъёму уровня воды во время нагона, а большая – падению. Это объясняется тем, что в начале нагона более солёные воды еще не успели достигнуть точки наблюдения, а при ослаблении ветра и начавшемся падении уровня эти воды еще могли продолжать поступательное движение, и лишь через некоторое время стали отступать под действием более пресных речных вод. Данный процесс наблюдается не при всех

нагонах. Очень четко он прослеживался во время нагона 26–28 декабря 2015 г. (рис. 3.6), а также во время нагонов 26–28 июня 2014 г. и 3–4 июля 2015 г. Во время нагонов 2–4 октября 2015 г. и 27–30 марта 2017 г. картина немного сглажена, но гистерезисный характер связи солености и уровня сохраняется.

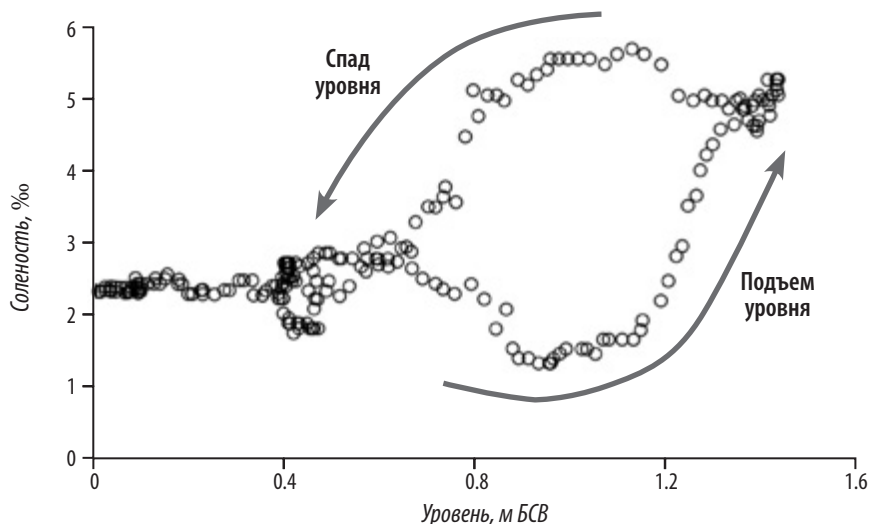


Рис. 3.6. Диаграмма рассеяния величин уровня и солености во время нагона 26–28 декабря 2015 г.

Используемая модель позволяет учитывать подобные эффекты и корректно прогнозировать распределение солености по акватории Таганрогского залива и устьевого взморья в период нагонов.

Моделирование процесса распределения солености во время нагона в период с 27 по 30 марта 2017 г. дало хорошие результаты на период активной фазы нагона (27–29 марта) (рис. 3.7). При этом погрешность расчетов по солености составляла 28 %, а по уровню воды – 15 %. Расчеты гидрофизических параметров во время нагонов 26–28 июня 2014 г. и 26–28 декабря 2015 г. также показали хорошее совпадение расчетных и наблюдаемых значений уровня воды и солености.

Развитие гидрологической ситуации во время экстремальных нагонов (24–25 сентября 2014 г.) происходит по схожему сценарию. Так, в период 16–23 сентября 2014 г., когда наблюдался сгон воды, отмечался обычный уровень минерализации речной воды на акватории порта г. Азов (гирло Песчаное и Старый Дон, 12 км от устья). Во время штормового нагона

24 сентября в пик подъема уровня воды соленость достигла 5,6–6,0 ‰. После пика наводнения снижение солености происходило не сразу: процесс распреснения до 0,5 ‰ растянулся во времени на 6 сут. [Матишов, 2015].

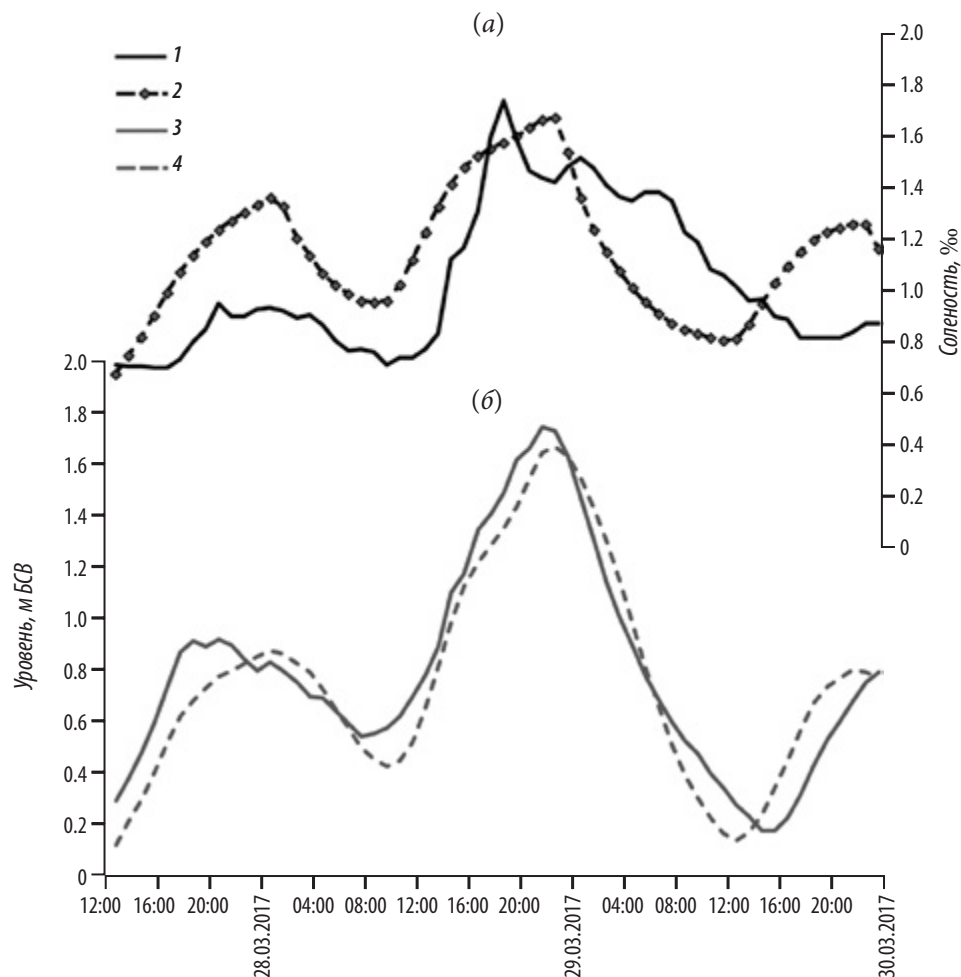


Рис. 3.7. Результаты моделирования солености (а) и уровня (б) воды во время нагона с 27 по 30 марта 2017 г. Данные измерений солености воды (1), соленость, рассчитанная по модели (2), данные измерений уровня (3), уровень, рассчитанный по модели (4)

С помощью математической модели была восстановлена динамика концентрации соли во время экстремального нагона воды 24–25 сентября 2014 г., в восточной части Таганрогского залива, где датчики учета со-

лености на тот момент не были установлены. Изменение концентрации соли в точке, соответствующей устью гирла Песчаного, представлено на рисунке 3.8.

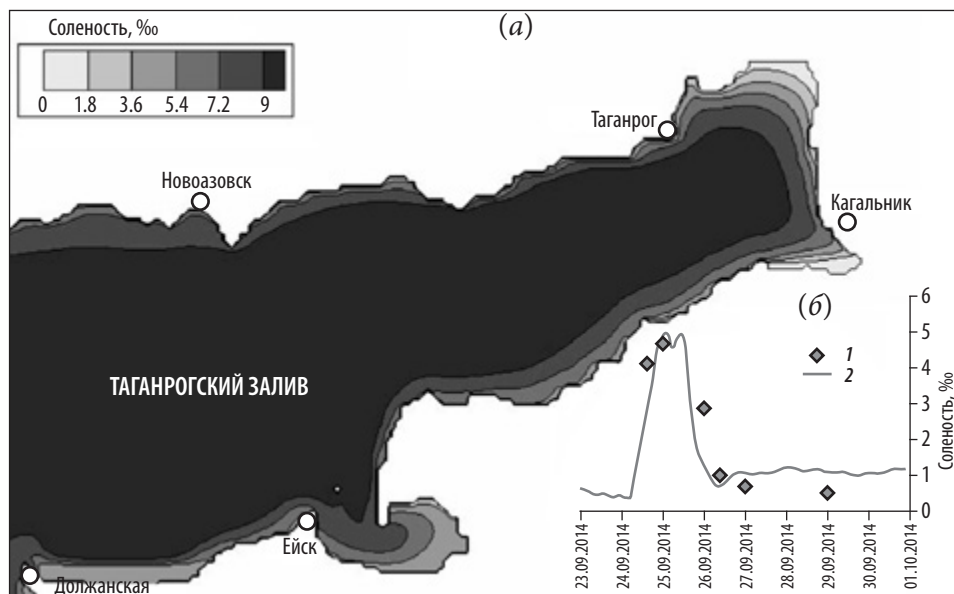


Рис. 3.8. Распределение солёности в Таганрогском заливе в момент максимальных зафиксированных значений 24.09.2014 (а), ход солёности в гирле Песчаном с 23 по 29 сентября 2014 г. (б). Данные измерений солёности воды (1), солёность, рассчитанная по модели (2)

Видно, что вначале, при восточном ветре во время стога воды из залива, концентрация соли убывала до значения, соответствующего пресной воде, а затем, при ветре западного направления, стала быстро увеличиваться и достигла 5,6 ‰. После этого с ослаблением ветра солёность снова стала уменьшаться. Проведенные расчеты позволили получить поле распределения солёности в момент наибольшей ее концентрации.

3.4. Численное исследование поступления соленых вод в дельту Дона

Расчет гидродинамических параметров проводился на уже откалиброванной ранее модели течений в дельте Дона [Чикин и др., 2019], где ее калибровка проводилась путем подбора коэффициентов шероховатости.

Для верификации данной модели была рассмотрена ситуация, сложившаяся на период с 23 по 27 сентября 2014 г., когда в результате действия сильного юго-западного ветра вода из Таганрогского залива стала поступать в русло Дона. Рассматривался временной интервал длиной 96 часов, что соответствовало четырем суткам наблюдения.

Данные солёности в области устьевого взморья и расходов воды в рукаве Старый Дон, а также данные солёности в акватории порта Азов представлены в таблицах 3.1 и 3.2 соответственно.

Таблица 3.1

**Изменение солёности в устьевом взморье
на период с 23 по 27 сентября 2014 г. и расхода воды,
поступающей в рукав Старый Дон**

Дата	Павло-Очаковская коса	Таганрог	Рукав Старый Дон
	Солёность, ‰	Солёность, ‰	Расход воды, м³/с
23.09.2014	0,92	4,92	260,4
24.09.2014	3,82	4,96	301,2
25.09.2014	6,33	4,97	426,6
26.09.2014	6,52	4,95	375,6
27.09.2014	5,94	4,94	–

Таблица 3.2

**Изменение солёности в акватории порта Азов
на период с 23 по 27 сентября 2014 г.**

Дата	Время	Солёность, ‰
23.09.2014	–	0,48
24.09.2014	15:42	4,1
24.09.2014	23:00	5,59
25.09.2014	8:30	4,69
26.09.2014	8:30	2,86
26.09.2014	17:00	1,18
27.09.2014	8:30	0,69

Из-за сложной штормовой ситуации данные, приведенные в таблицах 3.1. и 3.2, нерегулярны по времени. Кроме того, соленость в области взморья и расход поступающей в рукав воды указаны среднесуточными. Всё это налагало определенные трудности при верификации модели.

Данные по изменению уровня воды на метеостанции в п. Донской брались на сайте Эмерсит, точка наблюдения 1001 [<http://www.emercit.com/map/>].

Расчетные значения снимались каждые 10 минут модельного времени. На рисунке 3.9 приведен график расчетных значений солености на указанный период в районе Азовского порта, а также наблюденные значения в отдельные моменты времени. Изменение концентрации соли зависит как от скорости течения, так и от направления потока. Соленая вода может попасть в русло реки при наличии обратного течения воды снизу вверх по руслу. Видно, что с резким повышением уровня воды повышается и концентрация соли. Снижение концентрации соли наблюдается при появлении прямого течения в русле (скорость течения меняет знак с минуса на плюс).

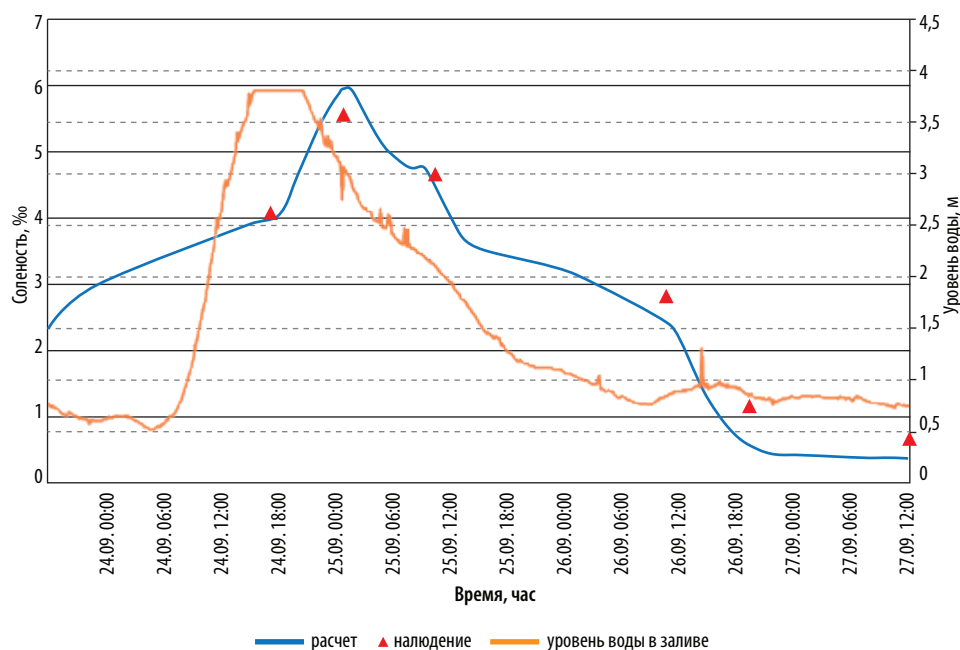


Рис. 3.9. Графики расчетных значений солености и уровня воды в устье Дона в период с 24 по 27 сентября 2014 г.

Треугольниками обозначены наблюденные значения

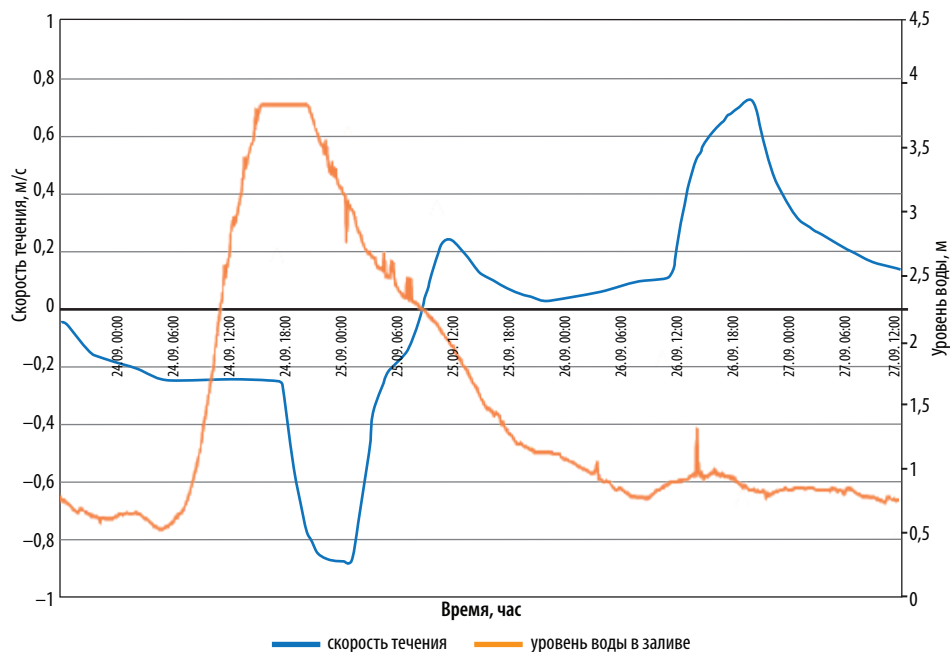


Рис. 3.10. Скорость течения в районе Азовского порта и колебание уровня воды в Таганрогском заливе в период с 24 по 27 сентября 2014 г.

Изменение скорости течения в рукаве Старый Дон в районе Азовского порта представлено на рисунке 3.10. Там же приведен график изменения уровня воды в Таганрогском заливе.

Видно, что 24 сентября 2014 г. с резким поднятием уровня воды в Таганрогском заливе возникает обратное течение с увеличением скорости до 0,85 м/с. Затем, к утру 25 сентября, с понижением уровня воды в Таганрогском заливе обратное течение начинает сильно замедляться до нулевого значения, и далее восстанавливается прямое течение в рукаве с положительным значением скорости. Кроме того, на графике прослеживается периодическое изменение скорости. Это связано, скорее всего, с длинноволновыми колебаниями уровня в Таганрогском заливе в сгонно-нагонном процессе. Так, увеличение скорости прямого течения 26.09.14 с 12:00 до 18:00 определяется резким понижением уровня воды с 1,29 м до 0,75 м.

На рисунке 3.11 представлено изменение скоростей течения в точке разветвления основного русла Дона на рукава Старый Дон и Каланча. Расчеты показали, что во время нагона существует интервал времени, на протяжении которого вода из рукава Старый Дон перетекает в рукав

Каланча. На графике это проявляется различием знаков скоростей в руслах. Так, весь день 24.09.14 и ночь 25.09.14 наблюдалось обратное течение по обоим рукавам и основному руслу Дона, скорости течения имели отрицательные значения. Однако 25.09.14, примерно с 04:00 на протяжении двух часов, было отмечено прямое течение в Каланче, а в основном русле и Старом Доне – обратное. Это означает, что часть воды из Старого Дона при обратном течении поступает в Каланчу, а часть – в основное русло. После 06:00 картина течения меняется. Теперь уже в основном русле и в Каланче прямые течения, а в Старом Дону всё ещё обратное. Это означает, что из основного русла вся вода идет в Каланчу, а также туда попадает вода из Старого Дона. После 08:00, когда во всех рукавах восстанавливается прямое течение, вода из основного русла частью идет в Каланчу, а частью – в Старый Дон.

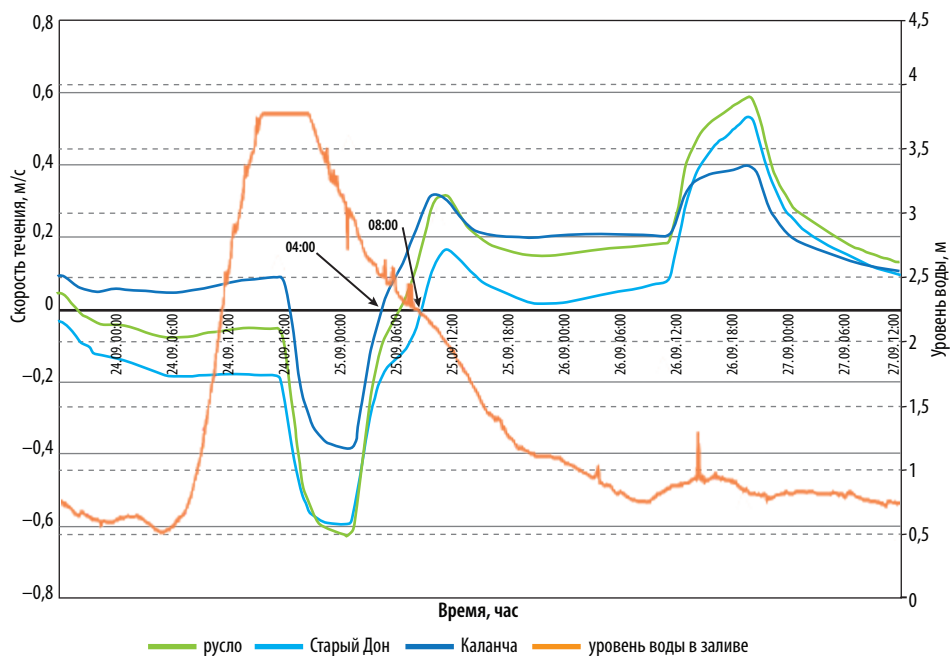


Рис. 3.11. Скорости течения в разветвлении основного русла на Старый Дон и Каланчу в период с 24 по 27 сентября 2014 г.

Погрешность расчетов, оцениваемая как относительная погрешность

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_i (C_i - C_i^0)^2}{\sum_i (C_i^0)^2}},$$

где C_i – расчетные значения, C_i^0 – наблюдаемые значения, составляла 11,3 %.

Если проводить оценку меры существенности различий расчетных значений солёности и наблюдаемых данных по критерию:

$$J_R = \sqrt{\frac{\sum_i (C_i - C_i^0)^2}{\sum_i (C_i + C_i^0)^2}},$$

то оценка дает значение 0,057. Согласно шкале оценки меры существенности различий структур [Региональная статистика ... 2006], полученный результат соответствует «весьма низкому уровню различий» (табл. 3.3).

Таблица 3.3

Шкала оценки меры существенности различий структур по критерию J_R

Интервалы значений J_R	Характеристика меры структурных различий
0,000 – 0,030	Тождественность структур
0,031 – 0,070	Весьма низкий уровень различий
0,071 – 0,150	Низкий уровень различий
0,151 – 0,300	Существенный уровень различий
0,301 – 0,500	Значительный уровень различий
0,501 – 0,700	Весьма значительный уровень различий
0,701 – 0,900	Противоположный тип структур
0,901 и выше	Полная противоположность структур

Итак, проведенные расчеты поля солёности показали, что данная математическая модель достаточно адекватно описывает процесс перемещения солёных масс воды под действием ветра в Таганрогском заливе, что дает возможность «доопределять» значения солёности в любой точке залива, где датчики учета солёности не были установлены. Кроме того, данный подход позволяет прогнозировать распределение концентрации соли при определенных направлениях ветра.

Исследование сгонно-нагонных явлений в устье Дона показало, что в данном явлении присутствуют сложные гидродинамические процессы,

которые не всегда можно описать математической моделью, дающей результаты с достаточно высокой точностью. При экстремальных подъемах уровня воды, когда происходит затопление дельты Дона и рукава превращаются в один общий водоем, данная модель не может дать хорошего результата. В то же время представленная модель дает представление об общей тенденции развития процесса возможного осолонения дельты Дона при нагонных явлениях.

Таким образом, изучение такого опасного явления, как нетипичные затоки соленых черноморских вод в дельту Дона, необходимо для прогнозирования экстремальных наводнений и обеспечения безопасности населения азовского побережья.

В условиях постоянно возрастающего антропогенного воздействия, увеличения масштабов и частоты опасных природных и техногенных процессов и их последствий исследованию проблем безопасности придается особое значение. В связи с этим приоритетными научными направлениями являются идентификация и оценка природной и техногенной опасности, совершенствование систем мониторинга, прогнозирования и оценки риска возникновения чрезвычайных ситуаций, развитие теоретических и практических основ управления безопасностью, разработка комплекса мероприятий по обеспечению безопасности. Особенно актуальными становятся мониторинговые исследования в бассейне Азовского моря, которые бы включали как классические, натурные наблюдения, так и новые технологии бесконтактного мониторинга.

Рост количества опасных природных явлений на фоне интенсификации освоения окружающей среды обуславливает значительное повышение вероятности того, что в зоне развития этих процессов окажутся наиболее освоенные территории. Особенно уязвимы прибрежные зоны, где любое стихийное бедствие природного характера способно вызвать целую серию техногенных аварий и привести к значительным человеческим жертвам и материальным потерям. В связи с этим важно определить закономерности проявления природных катастроф и собрать данные по природным и техногенным чрезвычайным ситуациям, условиям их возникновения и факторам образования (фото- и видеоматериалов, данные о температуре воздуха, скорости ветра, уровне воды в режиме реального времени, ретроспективных данных о солености воды, среднегодовом уровне осадков и т.д.). Также существенным представляется использование современных математических моделей, информационных систем и методов обработки данных, что позволит лучше понимать природу этих процессов и прогнозировать, а затем снижать их негативные последствия. Любая система оценки

состояния природной среды складывается из проведения мониторинговых исследований, накопления, обработки, анализа и хранения полученных данных, на основе которых принимаются решения о перспективах функционирования и практического использования экосистемы.

В настоящее время достаточно распространенными являются способы оценки состояния гидроэкосистемы по структурным показателям отдельных компонентов биоты. При этом наиболее полная и объективная информация об экосистеме может быть получена при проведении биоиндикационных исследований, использующих сведения о численности, биомассе и динамических характеристиках [Булгаков, 2002]. Традиционный биомониторинг работает на уровне сообществ и потому обладает инерцией реагирования – отражает изменения окружающей среды *post factum*, с отставанием от изменения экологической ситуации на 3–5 лет. Кроме того, при традиционном мониторинге требуются значительные потери времени на пробоотбор, камеральную обработку, скрупулезные подсчеты и таксономическую верификацию. Эти работы необходимы для фундаментальных исследований по выявлению природы процессов трансформации морских экосистем [Гудимов, Комарова, 2019]. В результате доступными для исследований являются только интегральные показатели бентоса. При этом существуют и функциональные показатели бентоса. Они высокочувствительны, более экспрессны и проявляются задолго до начала структурных изменений, но пока эти показатели применяются недостаточно широко, т.к. требуют высокой квалификации специалистов и приборного обеспечения [Мисейко, 2004].

В настоящее время существует потребность в разработке научно-методологических и методических основ биологического мониторинга для водных экосистем Понто-Каспийского региона, в частности для Азовского моря. Но с помощью анализа одних показателей бентоса невозможно отслеживать параметры опасного природного процесса в краткосрочном временном периоде.

Поэтому для интеллектуальных систем мониторинга и прогнозирования опасных природных процессов в части автоматизированной помощи принятия решений представляется важным одновременно учитывать и другие показатели, которые относятся к метеорологическому и гидрологическому мониторингу и могут оказывать любое прямое или косвенное влияние на развитие зообентоса. В результате при мониторинге и прогнозировании опасных природных процессов возникает задача получения, накопления, хранения и сопоставления, а также обработки больших объемов децентра-

лизованных данных, содержащих информацию о различных интегральных и функциональных параметрах гидроэкосистемы. Данная задача может быть решена с помощью применения современных информационных технологий цифровой экономики и интеллектуального анализа данных, построения новых моделей для подсистем помощи принятия решений, а выявление неочевидных взаимосвязей между данными и уровень их взаимного влияния можно определить с помощью когнитивного анализа.

***Технология мониторинга опасных явлений
эстуарных зон юга России на основе анализа
современного состояния популяций макрозообентоса***

Азовское море является одним из наиболее изученных водоемов юга России, поэтому малейшие изменения в таксономическом составе и количественных характеристиках гидробионтов практически сразу становятся очевидными. При этом Азовское море характеризуется малой инертностью и быстрой реакцией на природные и антропогенные воздействия, что приводит к большой изменчивости гидролого-гидрохимических характеристик, которые затем отражаются на биологических объектах (изменение плотности популяций, динамика видовой и трофической структуры, поведенческие особенности).

В частности, следует особо отметить, что начиная со второй половины XX в. все очевиднее становится дефицит водных ресурсов в системе «Цимлянское водохранилище → Нижний Дон → Таганрогский залив → Азовское море». Эти акватории являются областью конфликта интересов различных отраслей экономики, таких как рыбное хозяйство и рыболовство, водный транспорт, энергетика, хозяйственно-питьевое водоснабжение, сельское хозяйство и промышленность, связанных с антропогенной активностью населения в водопользовании и водопотреблении. К тому же хозяйственная деятельность на этих участках (прибрежные зоны + акватории) в течение длительного периода развивалась без надлежащего учета экологических ограничений, определяемых ассимиляционной емкостью речных экосистем и замыкающих водоемов. Это привело к изменениям водного баланса, выражающимся в увеличении изъятия и потребления поверхностных вод, снижению качественных и количественных характеристик речного стока, увеличению масштабов эрозии почв, развитию береговых оползневых процессов, потере рыбохозяйственного значения водоемов, коренным перестройкам в экосистеме из-за проникновения и натурализации чужеродных видов.

Ранее авторами был разработан метод и алгоритмы обработки и передачи информации в системах мониторинга и диагностики для различных областей применения [Каляев и др., 2019; Мельник и др., 2019а, б; Melnik et al., 2019; Orda-Zhigulina et al., 2019]. На основании предложенного метода можно интегрировать между собой различные виды параметров гидроэкосистем юга России. Измеренные и обработанные данные, характеризующие различные параметры гидроэкосистемы в «спокойном» состоянии и во время воздействия на экосистему опасных природных процессов, можно использовать для автоматизированных систем помощи принятия решений.

На рисунке 4.1 отражена связь между различными видами мониторинга опасных процессов и показана роль биологического мониторинга как одного из наиболее важных интегральных показателей состояния гидроэкосистемы.

Различные компоненты данной системы мониторинга формируют различные типы разнородных данных, которые необходимо согласованно обрабатывать, передавать и сохранять при всех типах мониторинга, а также отслеживать антропогенную активность населения и экспертов и ее воздействие на состояние гидроэкосистемы юга России. Структура для интеллектуальной системы мониторинга и прогнозирования опасных природных процессов (с информационно-программной точки зрения) показана на рисунке 4.2.

Интеграция различных видов мониторинга между собой, выявление неочевидных связей между ними, формирование библиотеки данных для экспертов может быть реализовано с помощью аппарата когнитивного анализа. Когнитивные карты позволяют оценить совокупное влияние и значимость различных данных о состоянии гидроэкосистемы для того, чтобы подтвердить факт присутствия глубинных изменений в экосистеме и учесть эти изменения при имитационном моделировании опасных природных процессов. При этом основными интегральными данными, на оценку которых могут опираться эксперты, являются качественные и количественные показатели бентоса.

Как было сказано выше, одним из наиболее информативных индикаторов состояния любой гидроэкосистемы является зообентос, для которого были определены параметры для их учета при когнитивном моделировании. Зообентос отличается стабильной локализацией в течение длительного времени. В его состав входят наиболее долгоживущие (несколько лет) группы гидробионтов (моллюски, олигохеты, полихеты),

причем на их долю приходится больший процент в общей биомассе во многих водоемах и водотоках. Такие долгоживущие компоненты являются хорошими индикаторами хронического загрязнения и устойчивости экосистемы. Зообентос является основой систем биоиндикации стран ЕС и США. Но при этом параметры, используемые при биомониторинге на уровне сообществ, являются интегральными, т.е. суммарно характеризующими их состояние. Критерии, используемые при этом, могут быть: 1) структурные (численность, видовое обилие и разнообразие, число видов и их эквивалентность, видовая, половая, возрастная, холологическая, трофическая структура); 2) функциональные (например, непрерывный биосенсорный мониторинг [Гудимов, Комарова, 2019]). Изучение вышеперечисленных показателей для всего биоценоза в целом невыполнимо из-за огромного объема работы и большого объема данных, требующих обработки, поэтому для снижения времени исследований выбирают одну или несколько индикаторных групп (таксономических или функциональных) и изучают необходимые параметры внутри нее [Halffter, 1998].

Известно, что Таганрогский залив – наиболее мелководная часть Азовского моря, которая подвержена влиянию сгонно-нагонных явлений. В настоящее время для данной акватории характерно сложное сочетание пресных, слабосоленоватых и солоноватых вод: формируются шесть основных типов водных масс. Установлено, что в устьевой области Дона даже во время сгонов фиксируется значительное повышение солености (до 5,0 ‰), что свидетельствует о резко возросшей роли Азово-Черноморского компенсационного течения. Кроме нетипичной солености имеют место инверсии стратификации вод, внедрения в солоноватые воды линз пресной воды [Матишов и др., 2017]. Всё это не могло не повлечь изменений в донных сообществах данной акватории. Установлено, что в настоящее время в Таганрогском заливе вследствие маловодья Дона весь участок от пресных вод до границы слабосоленых (0,5–9 PSU) занят единым комплексом эвригалинных видов донных беспозвоночных. Колебания солености в этом диапазоне могут приводить к перестройкам количественной структуры сообщества и выпадению отдельных редких видов, но эти перестройки происходят в пределах одного имеющегося набора видов. Обобщение результатов многолетних исследований выявило тенденцию снижения доли понто-каспийских видов в донных сообществах в системе Нижний Дон – дельта Дона – Таганрогский залив [Булышева и др., 2016; Сёмин и др., 2018].

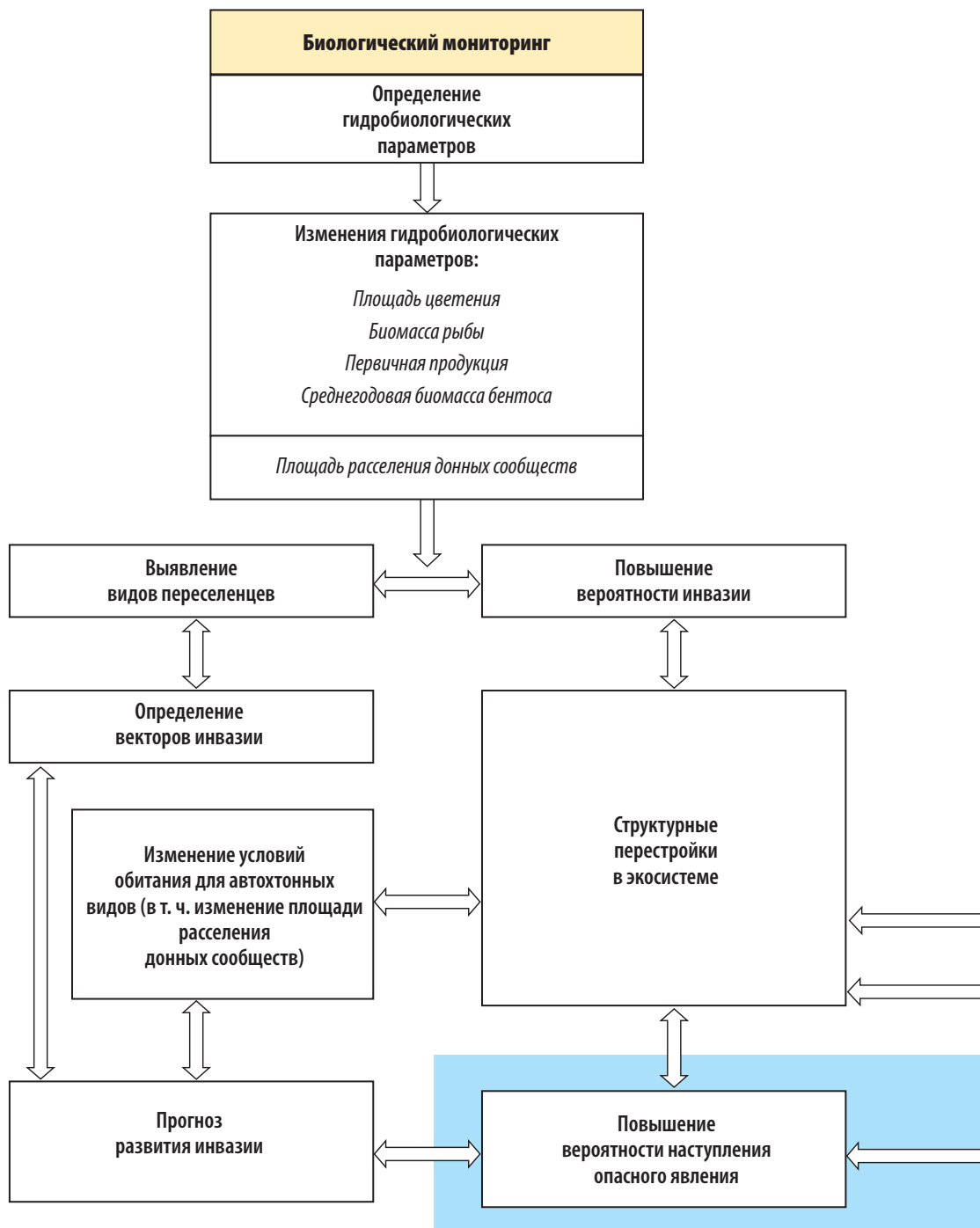
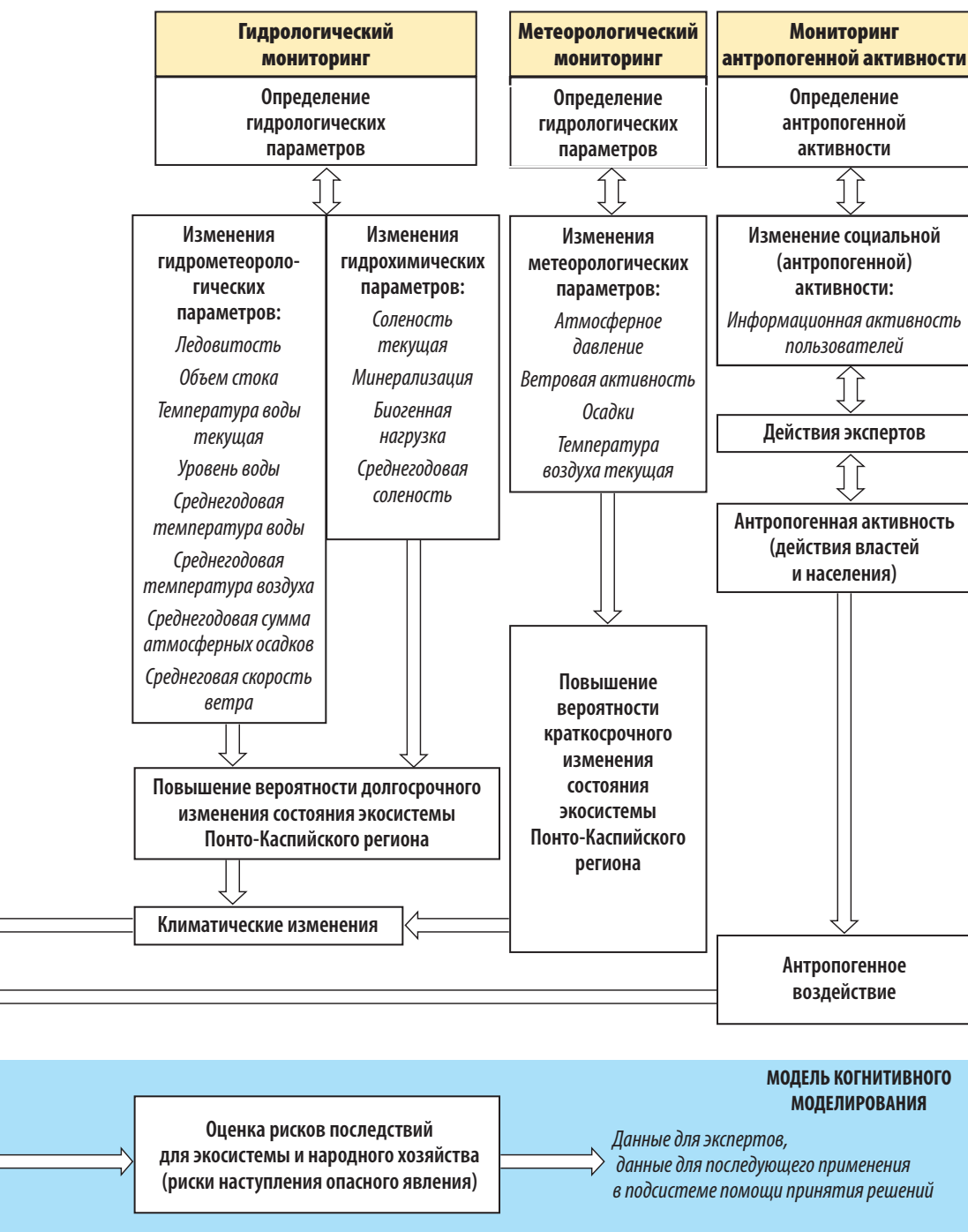


Рис. 4.1. Связь интегральных показателей биологического мониторинга с другими видами мониторинга для Азовского моря



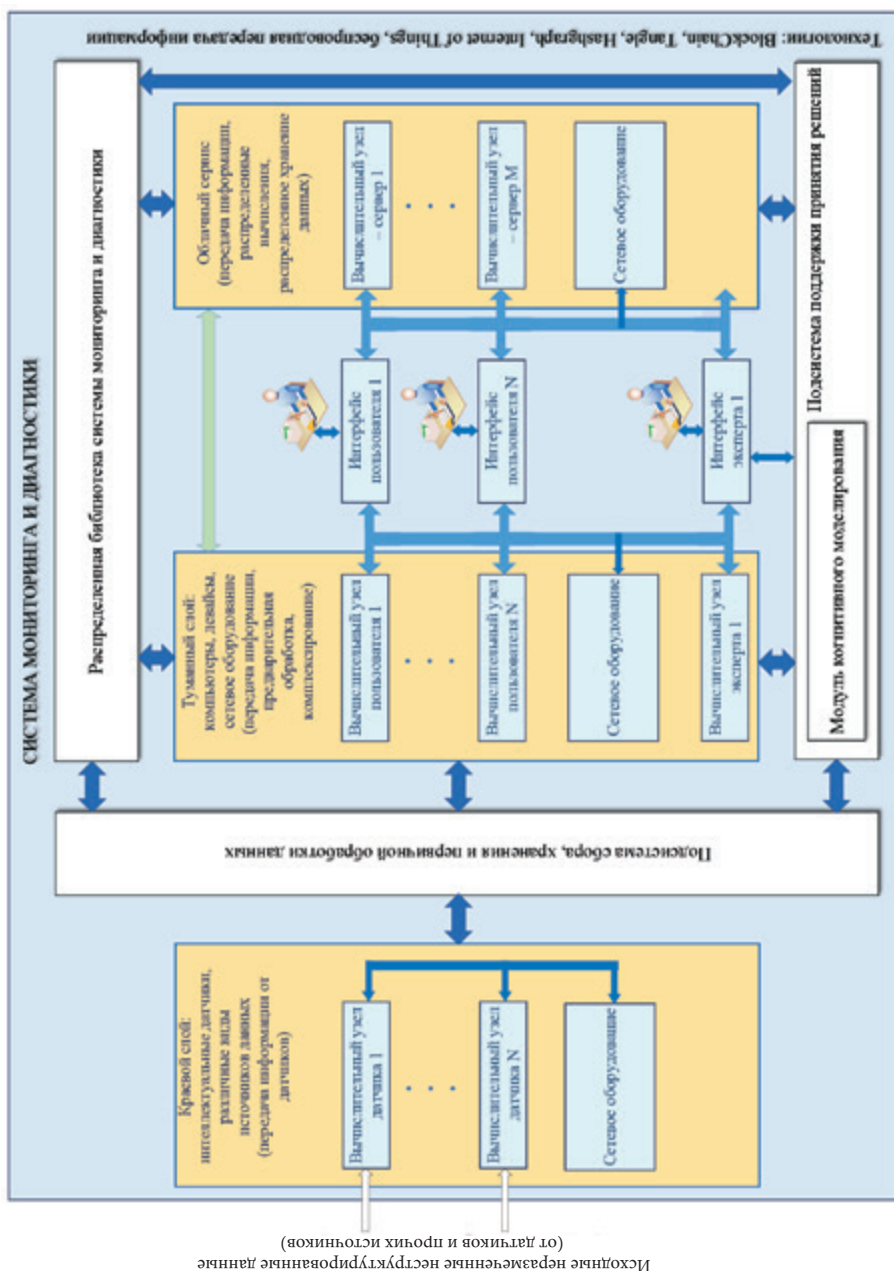


Рис. 4.2. Организация системы мониторинга и прогнозирования опасных процессов

Длительная история исследования фауны нижнего течения и устья Дона, Таганрогского залива и Азовского моря [Чернявский, 1868; Остроумов, Совинский, 1903; Анненкова, 1930; Мордухай-Болтовской, 1939, 1960; Воробьев, 1949; Брайко и др., 1968; Студеникина и др., 1998; Фроленко, 2000; Киселева, 2004; Сёмин и др., 2004а, б] позволяет говорить о детальной изученности видового состава макробеспозвоночных на данной акватории. Поэтому обнаружение в ходе мониторинговых исследований на реперных точках в створе х. Донской в 2013 г. полихеты *Laonome xeprovala* [Bick et al., 2018], ранее не отмечавшейся на акватории Азовского моря, позволило говорить об инвазивном характере произошедших фаунистических изменений [Сёмин и др., 2016]. В 2014 г. на реперном разрезе зарегистрирован еще один инвазионный вид полихет – *Marenzelleria neglecta* [Sikorski, Bick, 2004; Сёмин и др., 2016]. В 2015 г. она встречалась уже по всему Азовскому морю до Керченского пролива включительно. В 2016 г. маренцеллерия была отмечена уже в некоторых опресненных районах Черного моря (районы впадения малых рек северо-восточного побережья) [Syomin et al., 2017]. В Таганрогском заливе в настоящее время является наиболее широко распространенным видом макробентоса (встречаемость 90–100 % в разных съемках) и доминирует на 20–30 % станций, достигая максимальных значений численности и биомассы на границе восточного и центрального районов залива, где может быть единственным видом макрозообентоса в пробах. *Streblospio gynobranchiata* Rice & Levin, 1998 (отмечается с 2015 г.) к настоящему времени заселил центральную и западную части Таганрогского залива, но имеет низкие показатели биомассы [Дашкевич и др., 2014]. На акватории моря этот вид также расселился, но встречается редко и в небольшом количестве. Таким образом, регистрация в последнее время сразу трех ранее не отмеченных видов полихет является весомым прибавлением к региональному видовому составу. Это в свою очередь позволяет говорить об инвазивном характере произошедших фаунистических изменений.

Анализ многолетних данных по донным беспозвоночным Азовского моря, а также современные исследования его периферийных зон позволяют сделать вывод о том, что смена фауны происходит в периоды осолонения и опреснения водоема. Так, на фоне осолонения Азовского моря, наблюдающегося с 2009 г. [Набоженко, 2005], отмечено сокращение площадей, занимаемых некоторыми ценными понто-каспийскими видами. *Adacna vitrea* (Eichwald, 1829) (= *Adacna glabra* (Ostroumoff, 1905)), вселившийся в Таганрогский залив в начале XXI в. и образовавший здесь

обширные донные сообщества *Adacna vitrea* – *Monodacna colorata* (Eichwald, 1829) [Волкова, Денисов, 2006], перестал встречаться в заливе в дночерпательных пробах начиная с 2009 г. В 2014 г. один экземпляр адакны был отмечен в р. Дон на уровне Ростова выше Аксайского моста. Следует отметить, что начиная с 2009 г. популяция аборигенного вида *M. colorata* также сокращалась. Однако, по данным экспедиционных исследований, начиная с 2017 г. отмечается расширение ареала *M. colorata* в северной части Таганрогского залива и рост численности в водотоках дельты.

По данным экспедиционных исследований 2019 г. отмечено, что летом заток вод Черного моря существенным образом влиял на соленость Азовского моря, причем приточные соленые воды из Керченского пролива распространяются по акватории моря, заполняя придонный горизонт юго-восточной части моря вплоть до устьев северных рукавов Кубани. В центральной и западной частях моря наблюдалась менее устойчивая стратификация солености, при средних значениях солености на поверхности и на дне, превышающих 14 ‰. В настоящее время донные сообщества Азовского моря испытывают сильные изменения. Продолжается активный процесс вселения черноморской фауны.

4.1. Модуль когнитивного анализа как компонент подсистемы поддержки принятия решений для мониторинга и прогнозирования опасных природных процессов

В рамках системы мониторинга и прогнозирования опасных природных процессов были разработаны модель когнитивного моделирования и компоненты подсистемы поддержки принятия решений, входящей в систему мониторинга и прогнозирования опасных природных процессов (см. рис. 4.2).

Структура подсистемы поддержки принятия решений представлена на рисунке 4.3.

В состав подсистемы входят следующие модули:

- **модуль когнитивного анализа**, который включает в себя программное обеспечение для построения когнитивных карт и их анализа, реализует конкретизацию системы для определенного географического региона (в нашем случае – Понто-Каспийского). Программный модуль преобразования данных мониторинга природных явлений в прибрежных зонах в формат когнитивной имитационной модели экосистемы служит для автоматизированного сбора данных от различных источников, в том числе данных метеорологических измерений, данных о

состоянии макрозообентоса, данных гидрологических исследований, и является составной частью модуля когнитивного анализа.

- **модуль «Новая подключаемая подсистема из любой области»** показывает пример того, что разрабатываемая система является универсальной, поэтому каждый новый участник системы вне зависимости от области своей профессиональной деятельности может быть интегрирован в систему. Он сможет проводить свои научные исследования в своей области научных знаний, отслеживать различные параметры экосистемы и выявлять неочевидные закономерности за счет интеллектуального анализа данных. Таким образом, будет иметься очень широкий спектр научных исследований в различных сферах и будут видны новые пути разрешения критических ситуаций.

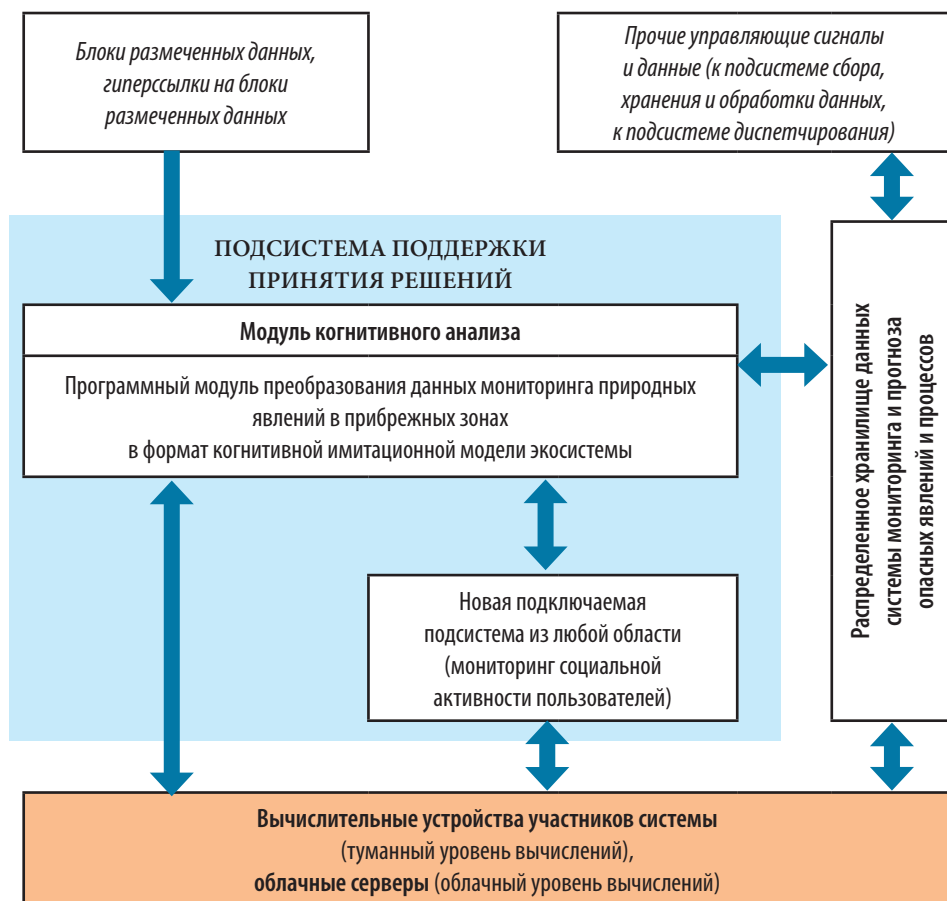


Рис. 4.3. Компоненты подсистемы поддержки принятия решений

4.2. Мониторинг сообщений пользователей в социальных сетях

Разработанная подсистема поддержки принятия решений имеет открытую архитектуру и позволяет подключать различные средства анализа данных, содержащих информацию о параметрах экосистемы и об антропогенной активности населения и экспертов. Примером такого модуля может являться модуль анализа активности пользователей в социальных сетях.

Мониторинг сообщений пользователей в социальных сетях имеет на выходе исходные данные для когнитивного анализа, использует API социальных сетей, а также поисковые алгоритмы для анализа отдельных (standalone) web-ресурсов с целью поиска и анализа сообщений пользователей, которые могут прямо или косвенно указывать на возможность развития опасного процесса.

Принципы реализации модуля когнитивного анализа подсистемы поддержки принятия решений на базе поведения сообществ зообентоса под действием антропогенных и климатических факторов, в том числе экстремальных условий окружающей среды

Рассмотрение водной экосистемы Понто-Каспийского региона требует учета всех ее особенностей и закономерностей, которым подчиняются явления и процессы в таких сложных системах:

- 1) закономерности взаимодействия частей и целого (целостность, интегративность);
- 2) закономерности иерархической упорядоченности систем (коммуникативность, иерархичность);
- 3) закономерности функционирования и развития систем (историчность, самоорганизация);
- 4) закономерности осуществимости систем (эквифинальность, закон необходимого разнообразия, потенциальная эффективность);
- 5) закономерности целеобразования.

Сложным системам присущи слабоструктурированные проблемы, функционирование и принятие решений в условиях неопределенности разного рода, часто в условиях вероятностной неопределенности, большого количества данных, неточности и нечеткости информации. Для расширения и уточнения знаний о сложной системе, ее структуре,

для прогнозирования ее поведения и развития требуется использовать имитационное моделирование.

Для водной экосистемы Понто-Каспийского региона свойственны все вышеназванные признаки и условия, поэтому в исследовании использована методология когнитивного анализа сложных систем и соответствующий программный инструментарий имитационного моделирования.

Когнитивный анализ сложных систем является имитационным моделированием структуры и поведения сложной системы на основе количественных и качественных данных о ней. Когнитивная модель дает возможность не проводить эксперимент над «живой» системой, а имитировать ее поведение и возможное будущее развитие под влиянием разнообразных факторов, порождая новые знания о системе. Это позволяет обосновывать необходимые управленческие решения в рамках той или иной ситуации.

Под когнитивным анализом сложных систем понимается, многоэтапный процесс решения системы задач: идентификации объекта (использование теоретических знаний, применение экспертных, статистических и др. методов); анализа путей и циклов когнитивной модели (методы теории графов); анализа наблюдаемости, управляемости, устойчивости, чувствительности, адаптируемости, катастроф (методы теории управления, теории катастроф); композиции – декомпозиции; анализа различных аспектов сложности, анализа связности (методы теории графов, топологический анализ q-связности); самоорганизации системы (синергетика, теория сложных систем); прогнозирования (статистические методы); научного предвидения (сценарный анализ, анализ развития ситуаций – импульсное моделирование); решение задач оптимизации (решение обратной задачи, методы математического программирования); принятие решений в условиях различного рода неопределенности (методы теории принятия решений), сопутствующей существованию и изучению сложной системы. При этом принятие решений происходит как по отношению к самому изучаемому объекту, так и по отношению к процессу исследования. В процессе исследования и последовательного принятия решений экспертом объекты модели могут видоизменяться.

Основные этапы:

- 1) разработка когнитивной модели в той или иной математической форме (от когнитивной карты до векторного параметрического функционального графа и иерархических карт разного типа);

- 2) исследование свойств модели, на основании которых делается заключение о непротиворечии свойств модели свойствам исследуемой сложной системы;
- 3) сценарный анализ, проводимый путем импульсного моделирования на когнитивной модели, позволяющий определить возможное развитие ситуаций в системе под воздействием на нее внешних, внутренних возмущений и управляющих воздействий.

Целью таких когнитивных исследований является понимание, объяснение, формальное представление сложной системы (на основе структуризации имеющихся о ней теоретических, практических знаний, статистических и экспертных данных) и порождение новых знаний о системе, что необходимо для принятия обоснованных управленческих решений.

Экосистема любого иерархического уровня может устойчиво функционировать только в пределах реализации обратных связей или в области нарушения этих связей, когда элементы экосистемы способны компенсировать отклонения, определяемые положительной обратной связью (например, при поступлении загрязнений в водную экосистему она еще способна к самоочищению). Эта область устойчивости экосистемы называется гомеостатическим плато (рис. 4.4).

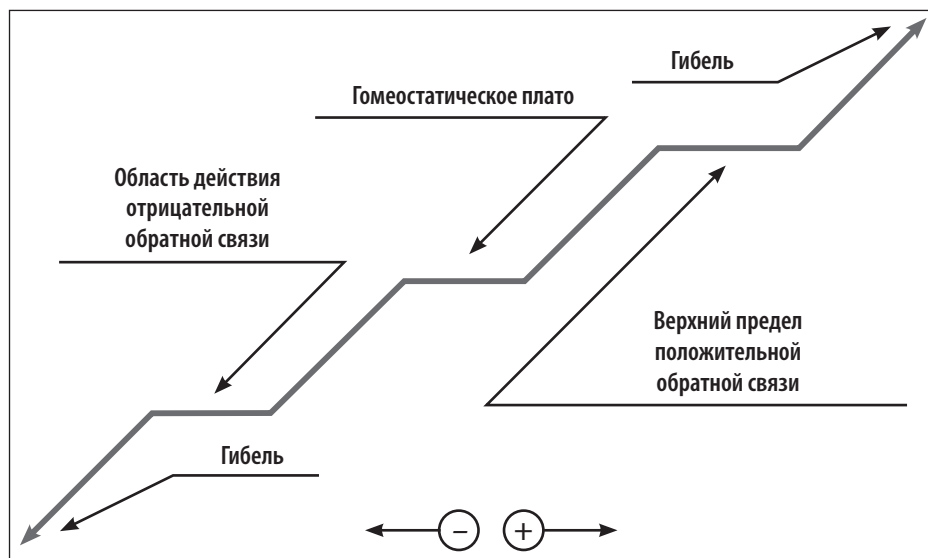


Рис. 4.4. Схема гомеостатического плато

Как видно из рисунка, экосистема для поддержания своей жизни должна находиться на гомеостатическом плато, потому что смещение в

любую из сторон закончится гибелью. Под переходом экосистемы в иное состояние в настоящем отчете имеется в виду «уход» экосистемы с гомеостатического плато.

При исследовании водной экосистемы Понто-Каспийского региона предложено применить иерархический когнитивный анализ, который на первом этапе моделирования состоит в разработке иерархической когнитивной карты. Необходимость такого моделирования вызвана тем, что изучаемая экологическая система, во-первых, состоит из различных блоков иерархически взаимосвязанных компонент, во-вторых, наблюдается иерархия в уровнях взаимодействия с внешней средой и ее влияния, а также имеется иерархичность структуры принятия решений. В-третьих, при моделировании водной экосистемы Понто-Каспийского региона нужно учитывать то, что исходные данные, которые можно получать в результате мониторинга ее состояния, имеют большой объем (десятки тысяч измерений), поступают с разной периодичностью, имеют разную иерархическую значимость для всей системы.

Теоретической основой построения иерархических когнитивных карт является следующее.

Модель иерархической когнитивной карты имеет вид иерархии знаковых ориентированных графов отдельных уровней

$$I_G = \langle G_n, G_{n+1}, E_{n, n+1} \rangle, n \geq 1, \quad (1)$$

в которой G_n и G_{n+1} – когнитивные карты соответственно n и $n+1$ уровней, вершины которых соединены дугами $E_{n, n+1}$.

Когнитивная карта уровня $n, n+1$ – это знаковый ориентированный граф:

$$G_n = \langle V_n, E_n \rangle, \quad (2)$$

где $V_n = \{v_i \mid v_{in} \in V_{n, i} = 1, 2, \dots, kn\}$ – вершины когнитивной карты; $E_n = \{e_{ij} \mid e_{ijn} \in E_{n, i, j} = 1, 2, \dots, k\}$ – дуги, отображающие отношения (причинно-следственные связи) между вершинами. К преимуществам когнитивной карты относится возможность учитывать не только количественные, но и качественные факторы.

Рисунок 4.5 является иллюстрацией абстрактной трехуровневой иерархической когнитивной карты.

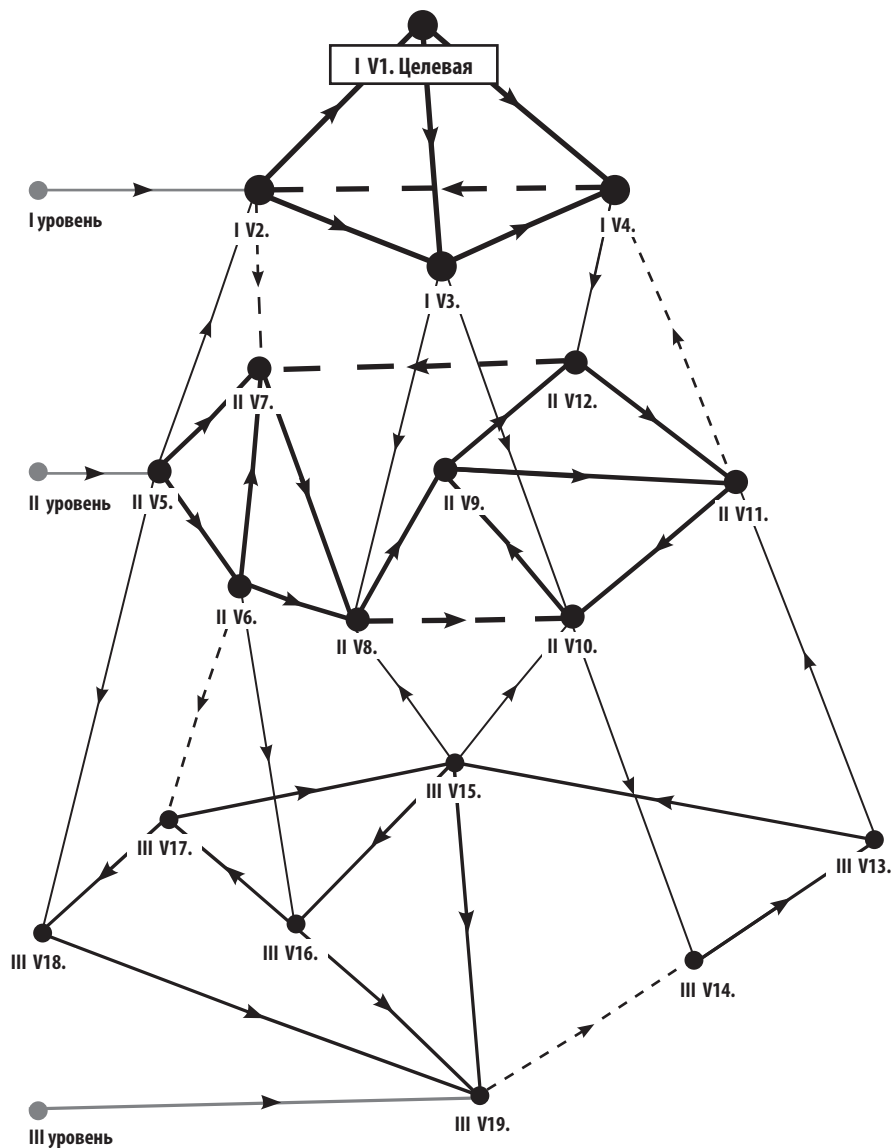


Рис. 4.5. Трехуровневая иерархическая когнитивная карта

При исследовании, описании, интерпретации модели сложной системы, такой как водная экосистема Понто-Каспийского региона, следует иметь в виду, что каждый объект (вершина когнитивной карты) такой системы может характеризоваться набором численных параметров. В таком случае модель каждого уровня иерархии должна иметь вид векторного параметрического функционального орграфа:

$$\Phi_n = \langle G_n, X_n, F_n, \theta \rangle, \quad (3)$$

где Φ_n – кортеж, в котором G_n – когнитивная карта уровня n ; X_n – множество параметров вершин V_n , θ – пространство параметров вершин; $F_n = f_n(x_p, x_p, e_{ij})$ – функционал преобразования дуг; F_n – преобразование может иметь вид функции f_{nij} , а также весового коэффициента w_{nij} , определенного экспертно или по статистическим данным.

Состояние водной экосистемы Понто-Каспийского региона может представлять угрозы населению и объектам инфраструктуры юга России, ее ухудшение может иметь негативные последствия для народного хозяйства. Поэтому при разработке соответствующей иерархической когнитивной карты следует учитывать социально-экономическую среду этого региона на верхнем уровне когнитивной модели.

Когнитивный анализ сложной водной экосистемы Понто-Каспийского региона и его результаты могут стать базой для создания интеллектуальной системы поддержки принятия решений. Назначением такой системы должно быть прогнозирование и оценка динамики изменений природных и антропогенных воздействий на экосистему для обеспечения своевременного принятия необходимых управленческих решений.

Должна быть проведена структуризация информации по типу данных, характерных для Понто-Каспийского региона, которые могут являться индикаторами наступления опасного явления или его признаками. Результаты структуризации показаны на рисунке 4.6. Алгоритм структурирования данных для когнитивной карты и работы с ней будет подробно описан в разделе 4.4.3 данной главы. Оценка работы прототипа модуля когнитивного модулирования будет показана в разделе 4.4.4 данной главы.

Таким образом, входными данными для модуля когнитивного анализа должны являться различные параметры экосистемы юга России, которые соответствуют вершинам когнитивной карты. Изменения значений таких параметров могут нести информацию о наступлении или процессе протекания опасного природного явления. Очевидные взаимосвязи между параметрами экосистемы определяются на этапе построения когнитивной карты. Неочевидные взаимосвязи между различными параметрами экосистемы выявляются уже после построения когнитивной карты в автоматическом режиме. Неочевидные взаимосвязи между параметрами системы соответствуют положительным или отрицательным циклам графа (когнитивной карты), в которые входят вершины.

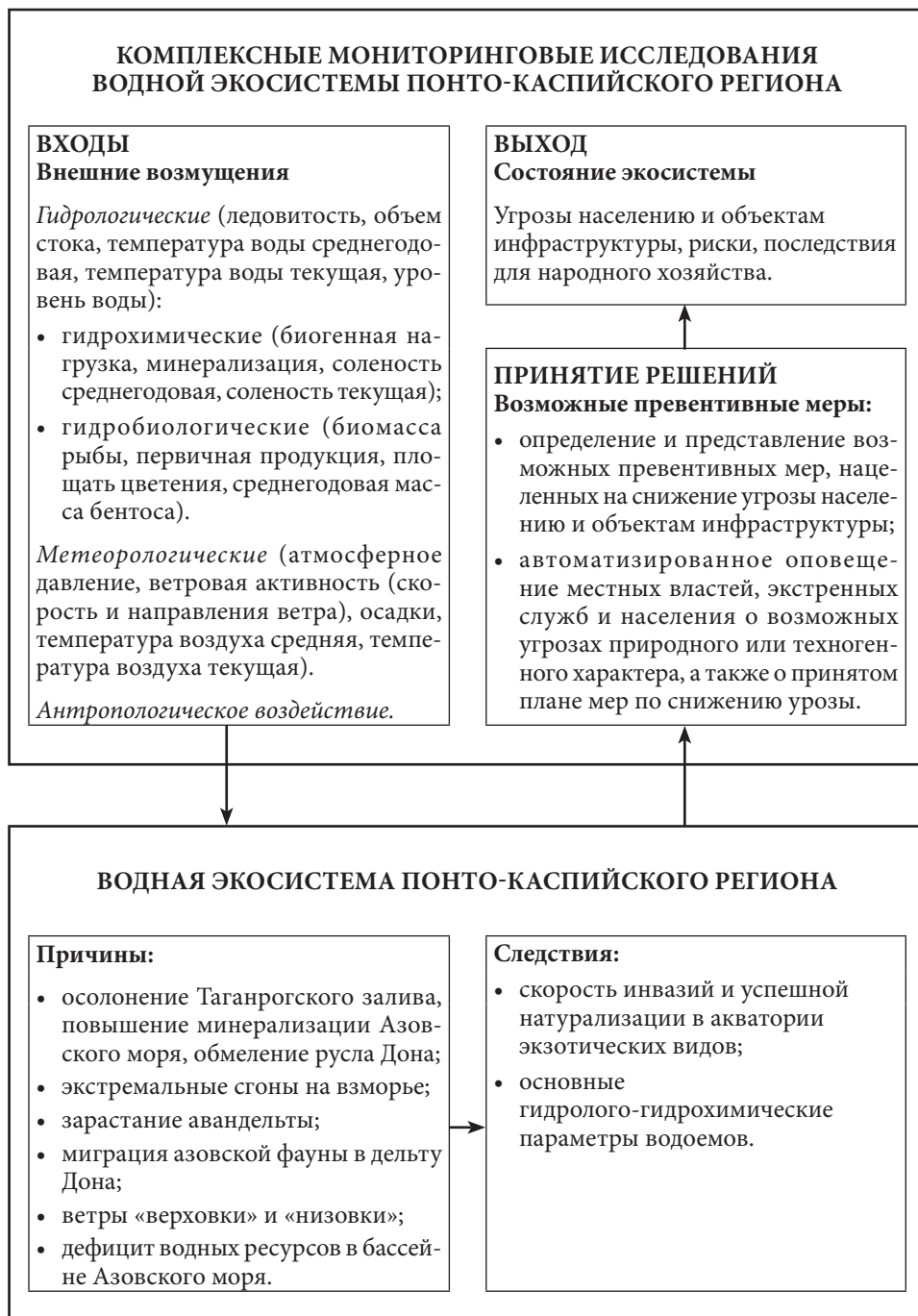


Рис. 4.6. Структуризация информации для подсистем интеллектуальной системы поддержки принятия решений

Методология когнитивного анализа была использована для создания компонента системы прогнозирования опасных процессов, который является частью подсистемы поддержки принятия решений. Алгоритм построения когнитивной карты, а также работа прототипа компонента системы-модуля когнитивного анализа и предварительная проверка алгоритмов работы компонентов для выполнения мониторинга и прогнозирования на основе анализа состояния сообществ зообентоса под действием антропогенных и климатических факторов, в том числе экстремальных условий окружающей среды отражены в разделе 4.4. настоящей главы.

На базе описанной методологии когнитивного анализа была разработана методика организации мониторинга опасных явлений эстуарных зон юга России на основе анализа современного состояния популяций макрозообентоса.

4.3. Методика организации мониторинга опасных явлений эстуарных зон юга России на основе анализа современного состояния популяций макрозообентоса

Мониторинг и анализ современного состояния экосистем, а также опасных явлений в регионе подразумевает сочетание следующих этапов:

1. Формирование перечня опасных процессов, подлежащих мониторингу и прогнозированию (см. раздел 4.1).
2. Формирование номенклатуры параметров, которые необходимо учитывать в процессе мониторинга и прогнозирования опасных процессов (см. раздел 4.1).
3. Построение онтологии, отражающей номенклатуру, взаимосвязи и иерархию параметров, используемых в ходе мониторинга и прогнозирования опасных процессов (см. п. 1).
4. Построение на базе онтологии и методологии когнитивного анализа когнитивной карты, отражающей взаимосвязи и значимость параметров и процессов, подлежащих мониторингу и прогнозированию (в соответствии с данным разделом, а также разделом 4.1).
5. При необходимости повторение п. 4, в случае значительных отличий процессов, подлежащих мониторингу и прогнозированию, по номенклатуре входных параметров (см. раздел 4.1).

Таким образом, проводится анализ современного состояния популяций макрозообентоса, формируется набор исходных (наиболее важных) параметров гидроэкосистемы Понто-Каспийского региона (на примере

системы «Нижний Дон – Таганрогский залив – Азовское море»). Затем с помощью аппарата когнитивного анализа определяются закономерности экосистемных процессов Таганрогского залива, дельты Дона и Азовского моря в виде ориентированных графов с вершинами различного веса. Что позволяет в строгой математической форме отразить взаимосвязи между различными параметрами гидроэкосистемы, их взаимную значимость и взаимное влияние.

4.4. Прототип модуля когнитивного анализа

Для проверки адекватности разработанной модели когнитивного моделирования авторами был разработан прототип компонента подсистемы поддержки принятия решений – модуль когнитивного анализа, который должен обеспечивать поддержку принятия управленческих решений при выполнении мониторинга и прогнозирования на основе анализа состояния сообществ зообентоса под действием антропогенных и климатических факторов, в том числе экстремальных условий окружающей среды.

Как было установлено ранее, входными данными для модуля когнитивного анализа являются гидрологические, гидробиологические и метеорологические параметры экосистемы юга России. Названия параметров соответствуют названиям вершин когнитивной карты третьего уровня. Изменения значений таких параметров могут нести информацию о наступлении или процессе протекания опасного природного процесса.

Очевидные взаимосвязи между параметрами экосистемы определяют на этапе построения когнитивной карты. Неочевидные взаимосвязи выявляются уже после построения когнитивной карты в автоматическом режиме. Неочевидные взаимосвязи между параметрами системы соответствуют положительным или отрицательным циклам графа (когнитивной карты), в которые входят вершины. Взаимное влияние параметров друг на друга можно оценить с помощью импульсного анализа.

Компонент системы прогнозирования опасных процессов, который является частью подсистемы поддержки принятия решений, алгоритм построения когнитивной карты, а также проверка прототипа компонента системы-модуля когнитивного анализа и предварительная проверка алгоритмов работы компонентов для выполнения мониторинга и прогнозирования будут проводиться для гидроэкосистемы Понто-Каспийского региона, при этом одним из основных интегральных по-

казателей является состояние сообществ зообентоса под действием антропогенных и климатических факторов, в том числе экстремальных условий окружающей среды.

Модуль когнитивного анализа является частью подсистемы принятия решений, связанной с состоянием экосистемы, как показано на рисунке 4.3. Данный модуль решает задачу моделирования сложной водной экосистемы Понто-Каспийского региона, и его результаты могут стать базой для создания интеллектуальной системы поддержки принятия решений. Назначением такой системы должно быть прогнозирование и оценка динамики изменений природных и антропогенных воздействий на экосистему для обеспечения своевременного принятия необходимых управленческих решений.

С учетом разработанных когнитивных карт, на базе метода обработки и передачи информации и мониторинга и прогнозирования опасных явлений был проведен когнитивный анализ с помощью авторской программы CMSS.

Исходными положениями при когнитивном анализе являлись следующие утверждения:

- характеристики зообентоса могут быть сведены к качественным и количественным интегральным показателям зообентоса. К качественным показателям можно отнести видовой состав и биоразнообразие бентоса. К количественным показателям – численность и биомассу зообентоса. Эти четыре показателя можно рассматривать одновременно как интегральные параметры, характеризующие глубинные изменения в состоянии экосистемы. На основании изменения величины параметров бентоса можно сделать вывод, находится ли экосистема в равновесии, либо экосистема вошла в стадию цикла глубинных изменений;
- условия обитания донных сообществ в Таганрогском заливе определяются взаимодействием пресного стока и морских вод.

В таблице 4.1 представлены данные о наличии причинно-следственных связей между вершинами когнитивной карты, матрица отношений.

Анализ устойчивости к возмущениям. На рисунке 4.7 приведены взаимосвязи и названия параметров, характеризующих экосистему юга России:

- трансформация морских вод, объема и качества пресного стока происходят как в долгосрочном периоде, так и при катастрофических изменениях погоды, которыми сопровождается наступление опасных климатических явлений;

- любые заметные изменения в окружающей среде или наступление опасных антропогенных воздействий сопровождаются увеличением количества сообщений пользователей о наступлении опасных явлений в социальных сетях.

Таблица 4.1

Матрица отношений
«Состояние экосистемы Понто-Каспийского региона»

	Вершины	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	V12	V13	V14
V1	Социально-экономическое состояние юга России					-1	1	1							
V2	Состояние экосистемы Понто-Каспийского региона	1			-1			1							
V3	Таксономическая структура макро-зообентоса бассейна Азовского моря				-1	-1	1								
V4	Угрозы населению и объектам инфраструктуры	-1					-1	1							
V5	Риски	-1		-1				1							
V6	Ресурсы	1	1		-1			-1	1				-1		
V7	Государственная экологическая политика	1			-1								1		
V8	Система мониторинга				-1	-1		1							
V9	Структурные перестройки в донных сообществах			1				-1							
V10	Климатические изменения в прибрежной зоне Азовского моря		1	1	1	1		1				1			
V11	Гидрометеорологические явления			1	-1									1	1
V12	Антропогенное воздействие		-1	1		1	-1								-1
V13	Уровень воды в водохранилище, площадь акватории			-1		-1									
V14	Абразия берегов, твердый сток Дона		1	1	1	1									

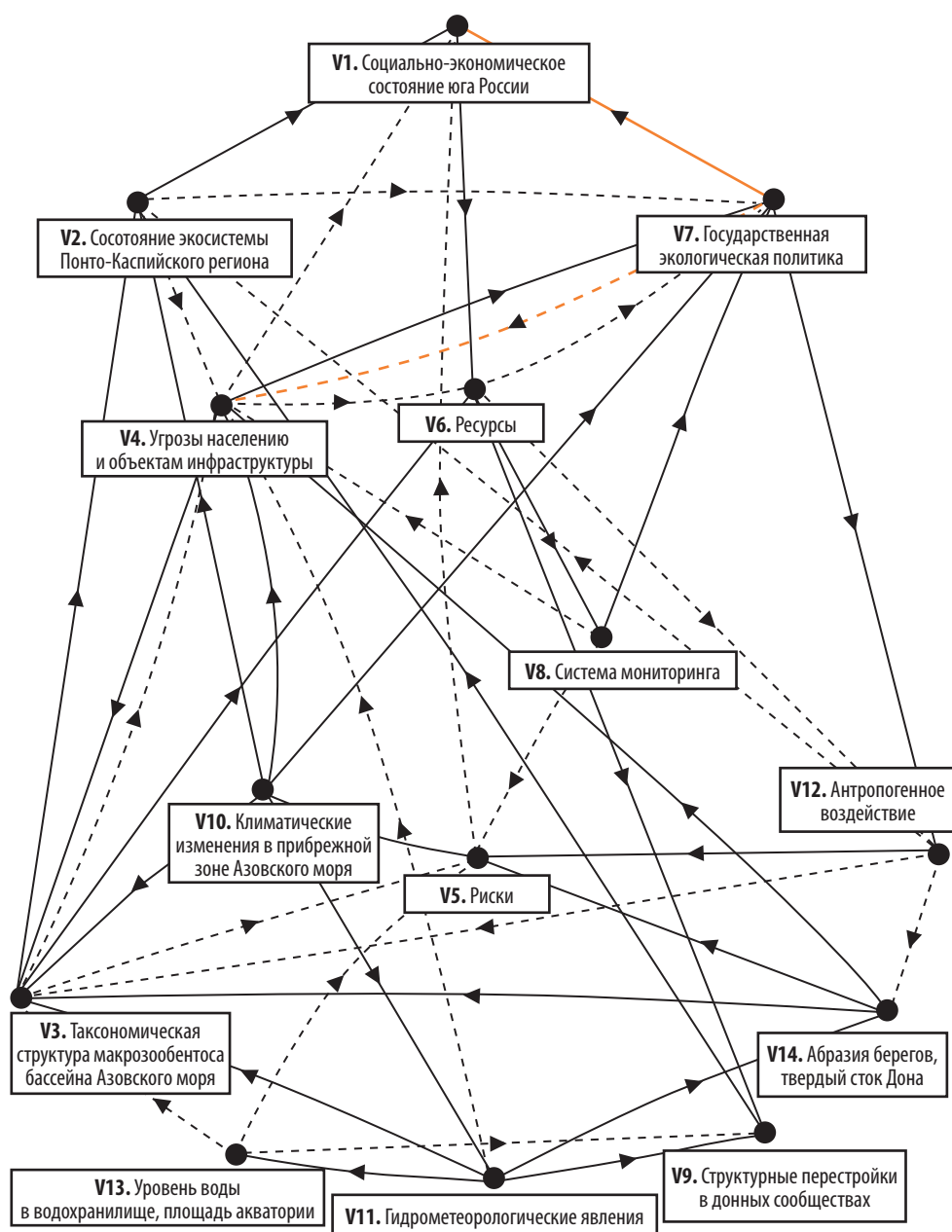


Рис. 4.7. Иерархическая когнитивная карта IG1:
«Состояние экосистемы Понто-Каспийского региона»,
верхний уровень

Разработка когнитивной модели сложной водной экосистемы Понто-Каспийского региона с учетом ее иерархичности производилась на основании теоретических данных об экосистемах, опросов экспертов, анализа статистических данных.

Исследование проводилось в три этапа. Первоначально была разработана и исследована когнитивная модель верхнего уровня IG1, затем на ее основе были разработаны и исследованы когнитивные модели IG12 и IG13.

4.4.1 | Разработка когнитивной модели верхнего уровня

В таблице 4.2 представлены вершины обобщенной когнитивной модели, отобранные в результате анализа информации о прибрежной зоне Азовского моря как части Понто-Каспийского региона.

Таблица 4.2

**Вершины когнитивной модели верхнего уровня IG1
«Состояние экосистемы Понто-Каспийского региона»**

Код	Наименование вершины	Назначение вершины
V1	Социально-экономическое состояние юга России	целевая
V2	Состояние экосистемы Понто-Каспийского региона	результатирующая
V3	Таксономическая структура макрозообентоса бассейна Азовского моря	индикативная
V4	Угрозы населению и объектам инфраструктуры	возмущающая
V5	Риски	возмущающая
V6	Ресурсы	базисная
V7	Государственная экологическая политика	управляющая
V8	Система мониторинга	базисная
V9	Структурные перестройки в донных сообществах	индикативная
V10	Климатические изменения в прибрежной зоне Азовского моря	возмущающая
V11	Гидрометеорологические явления	возмущающая
V12	Антропогенное воздействие	возмущающая
V13	Уровень воды в водохранилище, площадь акватории	базисная
V14	Абразия берегов, твердый сток Дона	возмущающая

На рисунке 4.8 приведен фрагмент таблицы вычисления корней характеристического уравнения матрицы отношений IG1, которое соответствует построенной когнитивной карте.

Собственные числа			
#	Действительная часть	Комплексная часть	Модуль (2.1855)
0	2.1855	0.0	1.8727
1	0.3803	1.8727	1.8727
2	0.3803	-1.8727	2.1855
3	-1.2336	0.0	1.2336

Рис. 4.8. Фрагмент таблицы вычисления корней характеристического уравнения матрицы отношений IG1

Когнитивная модель IG1 верхнего уровня неустойчива к возмущениям, т.к. максимальное по модулю число больше единицы: $|M|=2.1855>1$.

Анализ циклов и структурной устойчивости. На рисунке 4.9а, б изображены результаты анализа циклов когнитивной модели IG1.

Показаны очевидные и неочевидные взаимосвязи между различными параметрами, характеризующими гидроэкосистему прибрежной части Азовского моря. Данные циклы могут быть применены профильными исследователями-экспертами для наглядного представления взаимосвязей таких параметров гидроэкосистемы, как абразия берегов и твердый сток Дона, таксонометрическая структура бентоса, антропогенное воздействие, ресурсы, угрозы населению и объектам инфраструктуры, состояние экосистемы Понто-Каспийского региона, государственная экологическая политика и социально-экономическое состояние юга России, а также для оценки их взаимного влияния друг на друга. Кроме того, анализ импульсных процессов, которые могут быть рассмотрены на базе этих циклов (сценариев), позволяет оценить величину необходимого изменения антропогенного воздействия при изменении таксонометрической структуры бентоса и других перечисленных параметров (при этом одновременное изменение нескольких важных параметров экосистемы может свидетельствовать о наличии глубинных изменений в экосистеме, что повышает вероятность наступления опасного природного процесса).

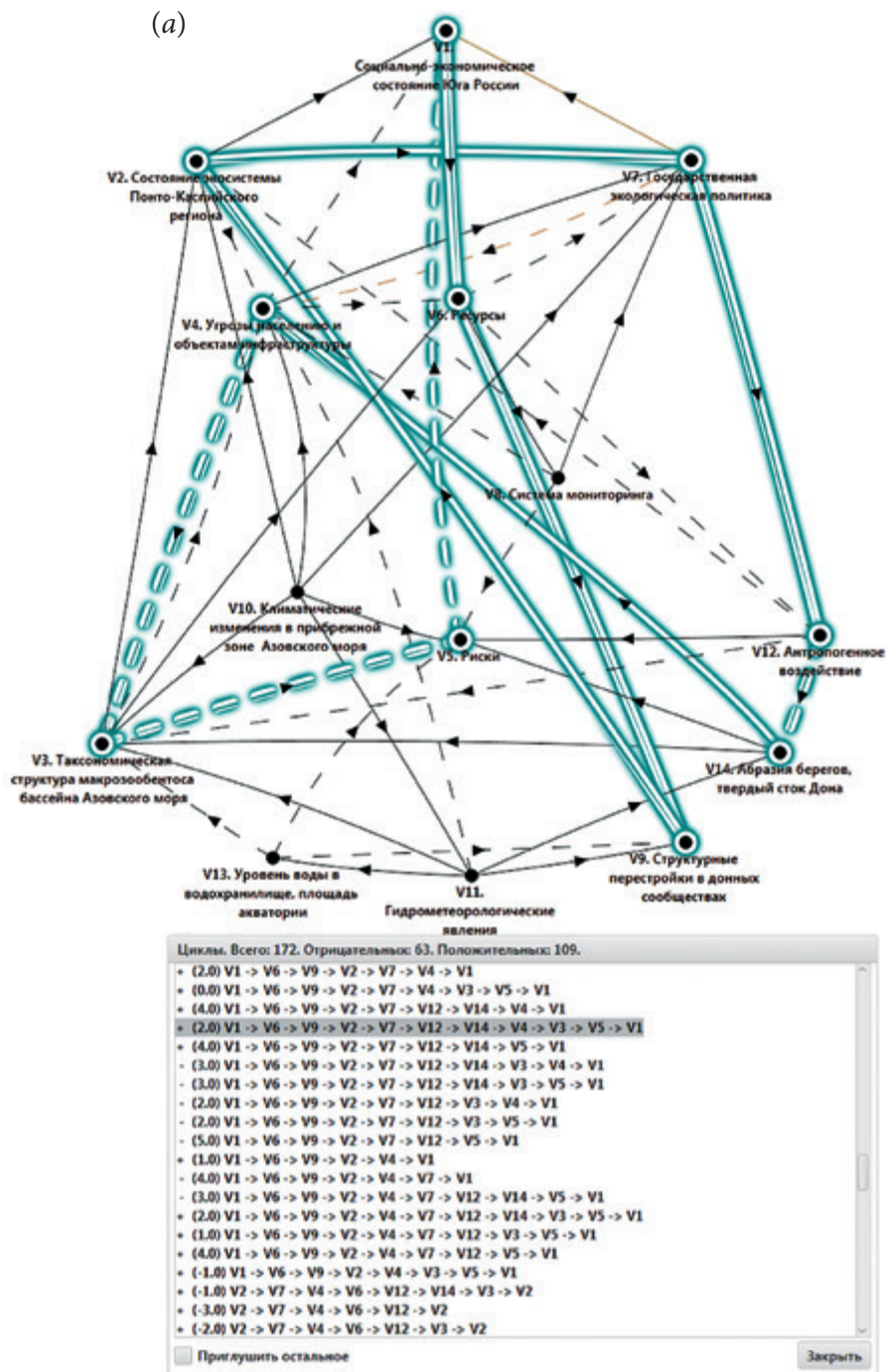
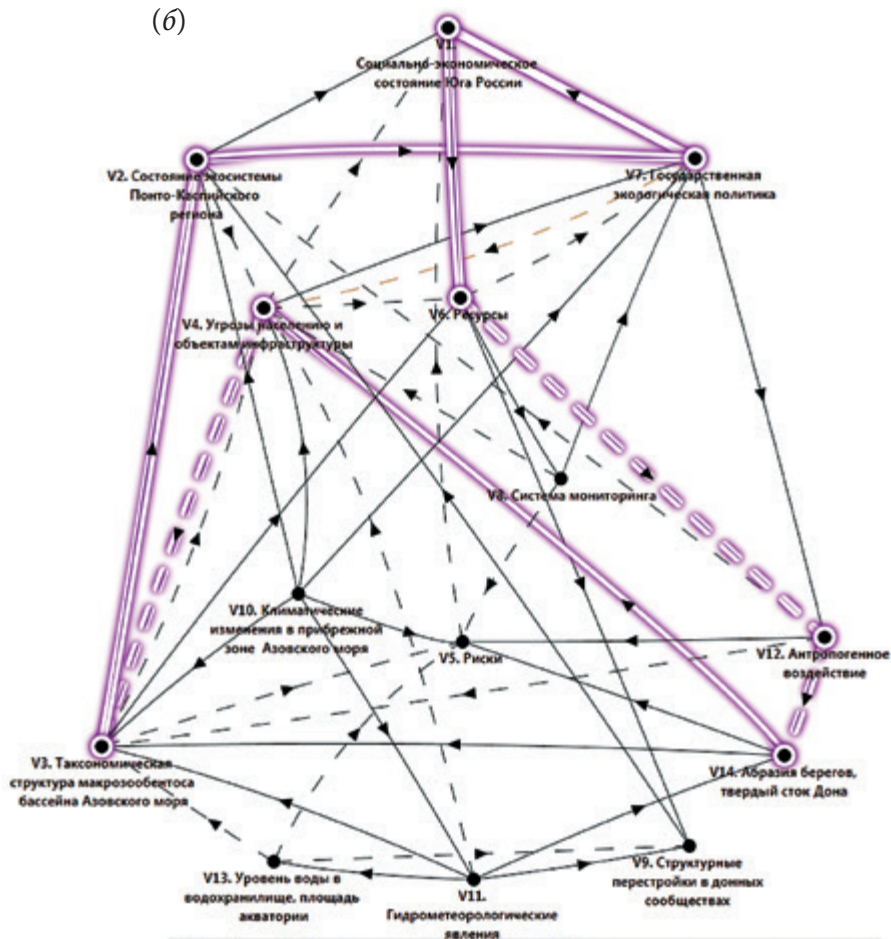


Рис. 4.9. (а), (б) – анализ циклов когнитивной модели IG1 с выделением положительных циклов модели

(б)



Циклы. Всего: 172. Отрицательных: 63. Положительных: 109.

(2.0) V1 -> V6 -> V8 -> V7 -> V12 -> V5 -> V4 -> V1
(4.0) V1 -> V6 -> V8 -> V7 -> V12 -> V5 -> V1
(-1.0) V1 -> V6 -> V12 -> V14 -> V4 -> V1
(2.0) V1 -> V6 -> V12 -> V14 -> V4 -> V7 -> V1
(-3.0) V1 -> V6 -> V12 -> V14 -> V4 -> V3 -> V5 -> V1
(-1.0) V1 -> V6 -> V12 -> V14 -> V4 -> V3 -> V2 -> V1
(2.0) V1 -> V6 -> V12 -> V14 -> V4 -> V3 -> V2 -> V7 -> V1
(-1.0) V1 -> V6 -> V12 -> V14 -> V5 -> V1
(-2.0) V1 -> V6 -> V12 -> V14 -> V3 -> V4 -> V1
(-1.0) V1 -> V6 -> V12 -> V14 -> V3 -> V4 -> V7 -> V1
(-2.0) V1 -> V6 -> V12 -> V14 -> V3 -> V5 -> V1
(2.0) V1 -> V6 -> V12 -> V14 -> V3 -> V2 -> V1
(3.0) V1 -> V6 -> V12 -> V14 -> V3 -> V2 -> V7 -> V1
(0.0) V1 -> V6 -> V12 -> V14 -> V3 -> V2 -> V7 -> V4 -> V1
(-1.0) V1 -> V6 -> V12 -> V14 -> V3 -> V2 -> V4 -> V1
(2.0) V1 -> V6 -> V12 -> V14 -> V3 -> V2 -> V4 -> V7 -> V1
(0.0) V1 -> V6 -> V12 -> V2 -> V1
(1.0) V1 -> V6 -> V12 -> V2 -> V7 -> V1
(-2.0) V1 -> V6 -> V12 -> V2 -> V7 -> V4 -> V1
(-4.0) V1 -> V6 -> V12 -> V2 -> V7 -> V4 -> V3 -> V5 -> V1

☐ Пригласить остальное Заккрыть

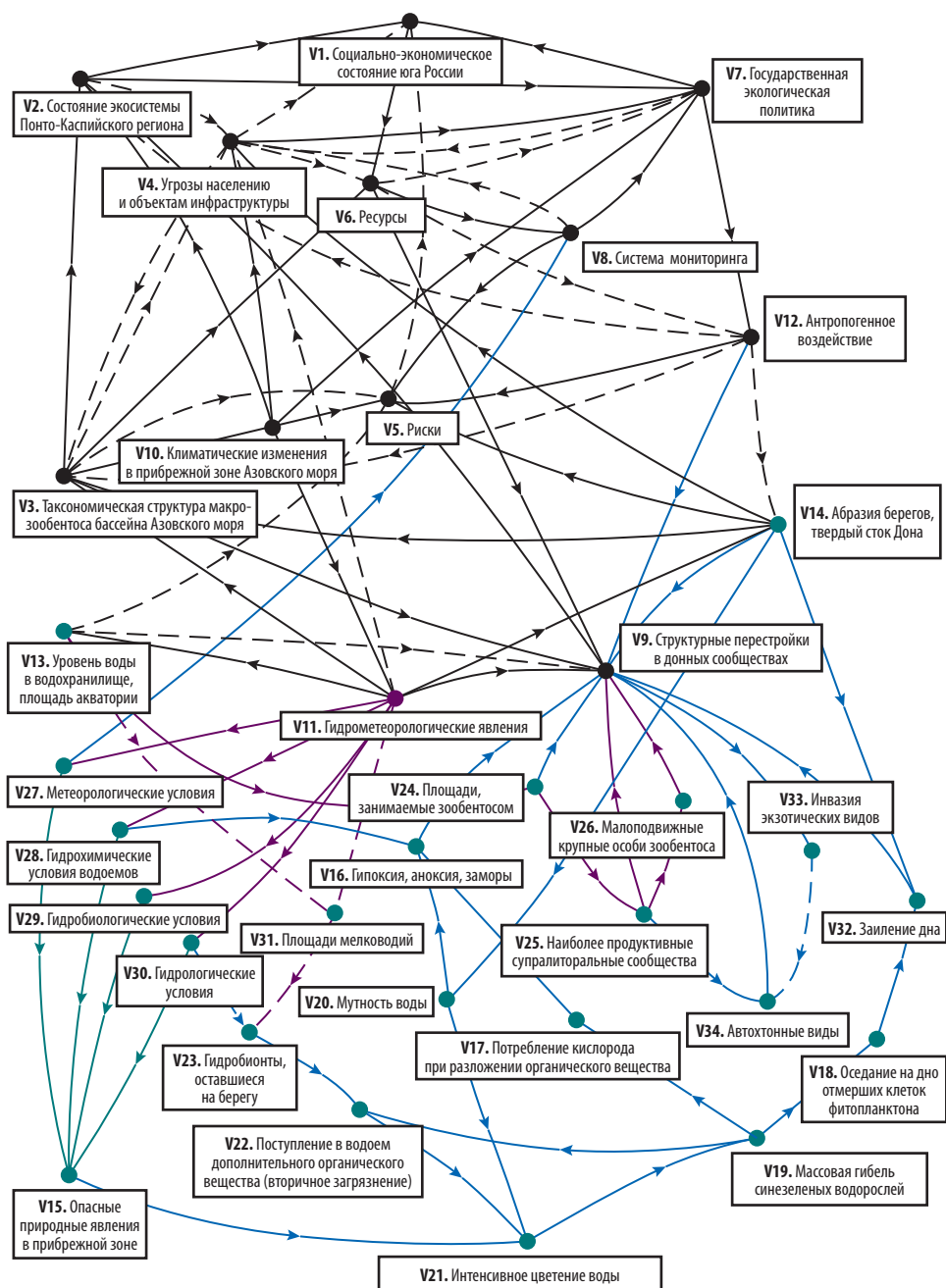


Рис. 4.10. Иерархическая когнитивная модель IG12: верхний (V1–V14) и средний (V15–V34) уровни

4.4.2 | Разработка двухуровневой когнитивной модели IG12 верхнего и среднего уровней

Параметры гидроэкосистемы очень разнообразны и должны быть выбраны с учетом особенностей Понто-Каспийского региона. Такая когнитивная карта является более сложной, имеет большее число вершин, но она может учесть большее число параметров и их взаимное влияние друг на друга, что позволяет рассмотреть большее количество взаимосвязей между различными видами мониторинга. На рисунке 4.10 изображена иерархическая когнитивная модель IG12: верхний (V1–V14) и средний (V15–V34) уровни.

Анализ устойчивости к возмущениям. На рисунке 4.11 приведен фрагмент расчета корней характеристического уравнения матрицы отношений RIG12 для двух уровней.

Собственные числа			
#	Действительная часть	Комплексная часть	Модуль (2.2161)
0	2.2161	0.0	2.2161
1	0.1869	1.8857	1.8857
2	0.1869	–1.8857	1.8857
3	0.6463	1.0998	1.0998
4	0.6463	–1.0998	1.0998
5	–1.5136	0.0	1.5136

Рис. 4.11. Фрагмент таблицы вычисления корней характеристического уравнения матрицы отношений RIG12 для двух уровней

Когнитивная модель IG верхнего и среднего уровней неустойчива к возмущениям, т.к. максимальное по модулю число больше единицы:

$$|M| = 2,2161 > 1.$$

Анализ циклов и структурной устойчивости. На рисунке 4.12 изображены результаты анализа циклов когнитивной модели IG12 двух уровней.

Анализ циклов когнитивной модели IG12 двух уровней показал, что в этой системе содержится 363 цикла, среди них – 254 цикла положительной (усиливающей) и 109 циклов отрицательной (стабилизирующей) обратной связи. Это свидетельствует о том, что анализируемая система структурно устойчива.

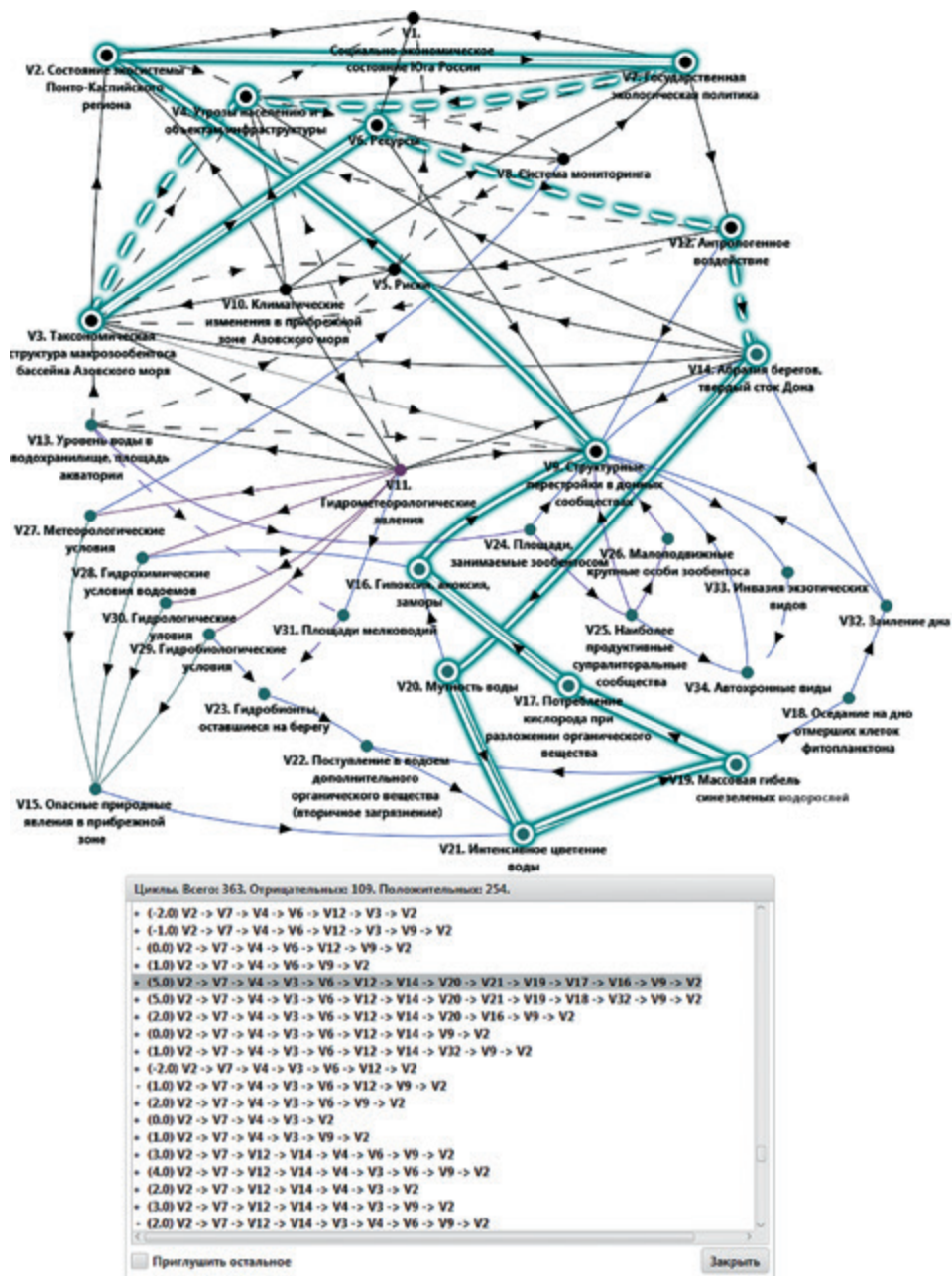


Рис. 4.12. Анализ циклов когнитивной модели IG12 двух уровней с выделением одного из положительных циклов модели

Импульсное моделирование, анализ сценариев. С помощью программной системы CMLS возможно внесение возмущений $Q=\{q_i\}$,

$i = 1, 2, \dots, k$ разной величины (нормированной) в любую из вершин, а также в их комбинацию. При внесении возмущений в вершины (то есть при изменении одного из параметров гидроэкосистемы либо параметров, характеризующих опасное явление) ищется ответ на вопрос: «А что будет с другими связанными параметрами, какой у них будет отклик, если один или несколько из параметров изменятся?» В процессе импульсного моделирования возможно вносить возмущающие воздействия на любом этапе моделирования. Это дает возможность изменять (корректировать) сценарии в модельной динамике, определять воздействия, приближающие процессы к желаемым.

В таблице 4.3 приведены результаты вычислений изменения импульсов (импульсные процессы) в вершинах когнитивной карты при реализации одного из сценариев при внесении положительного начального импульса $q_{10} = +1$ в вершину V10 в предположении благоприятных климатических воздействий на экосистему Понто-Каспийского региона. Результаты расчетов импульсных процессов в вершинах представлены на 12 шагах моделирования, число которых в данном случае можно считать достаточным, т.к. тенденции развития ситуаций в системе уже проявились.

Анализ циклов когнитивной модели IG12 двух уровней показал, что в этой системе содержится 363 цикла, среди них – 254 циклов положительной (усиливающей) и 109 циклов отрицательной (стабилизирующей) обратной связи. Это свидетельствует о том, что анализируемая система структурно устойчива.

На рисунке 4.13а, б изображены графики импульсных процессов в вершинах, построенных по данным таблицы 4.3. Графики представлены двумя рисунками (а и б) с меньшим количеством вершин в каждом из них в целях облегчения их визуального анализа.

На рисунке 4.13а показан пример импульсного сценария изменения антропогенного воздействия на экосистему юга России. Данный сценарий показывает взаимное влияние и изменение таких параметров, как климатические изменения в прибрежной зоне Азовского моря, таксономическая структура макрозообентоса Азовского моря, структурные перестройки в донных сообществах, абразия берегов, твердый сток Дона, гипоксия, аноксия, заморы, наиболее продуктивные супралиторальные сообщества, интегральный показатель, характеризующий автохтонные виды при начале климатических изменений (что соответствует положительному импульсному воздействию на вершину V10).

Таблица 4.3

Результаты вычислений изменения импульсов (импульсные процессы)
 в вершинах когнитивной карты при реализации одного из сценариев
 при внесении положительного начального импульса $q_{10} = +1$ в вершину V10

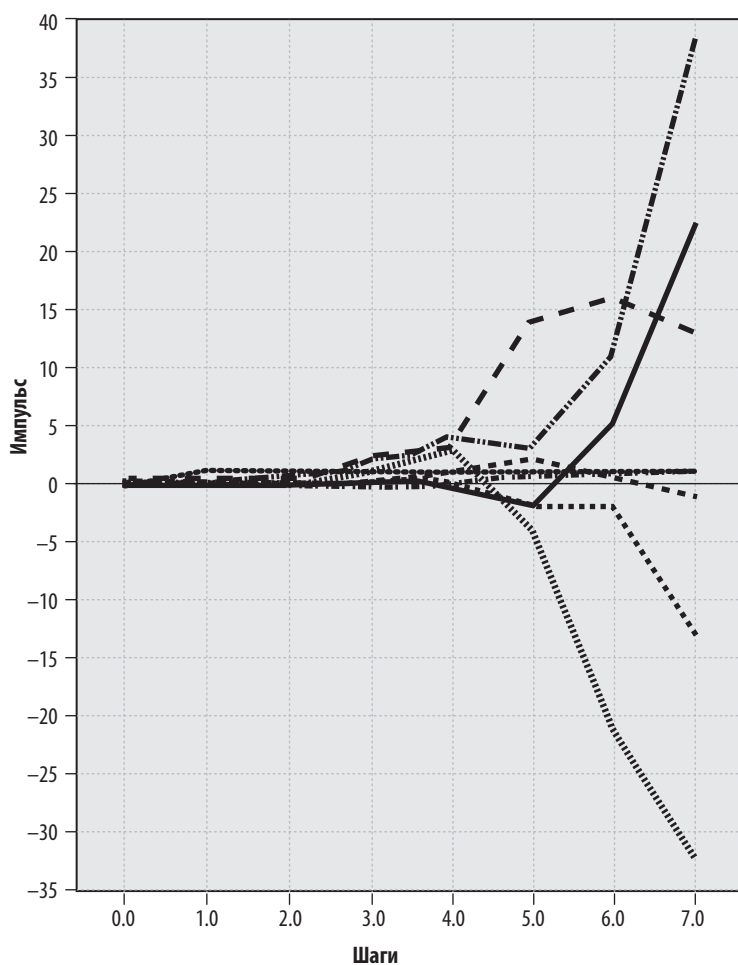
Код	Наименование вершины	Шаг													
		0.0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0	
I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
V1	Социально-экономическое состояние юга России	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.0	7.0	11.0	33.0	138.0	251.0	369.0	900.0	2745.0
V2	Состояние экосистемы Понто-Каспийского региона	0.0	0.0	1.0	2.0	3.0	5.0	22.0	49.0	84.0	164.0	479.0	1146.0	2208.0	
V3	Таксономическая структура макрозообентоса бассейна Азовского моря	0.0	0.0	1.0	1.0	4.0	3.0	11.0	38.0	87.0	151.0	298.0	819.0	1980.0	
V4	Угрозы населению и объектам инфраструктуры	0.0	0.0	1.0	-3.0	-5.0	-8.0	-11.0	-32.0	-96.0	-176.0	-317.0	-771.0	-2049.0	
V5	Риски	0.0	0.0	1.0	0.0	1.0	-2.0	-14.0	-45.0	-67.0	-109.0	-332.0	-921.0	-1802.0	
V6	Ресурсы	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0	17.0	18.0	33.0	103.0	321.0	578.0	984.0	2490.0	
V7	Государственная экологическая политика	0.0	0.0	1.0	3.0	0.0	-4.0	-14.0	12.0	4.0	-80.0	-228.0	-93.0	-29.0	
V8	Система мониторинга	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	5.0	18.0	19.0	34.0	104.0	322.0	579.0	985.0	
V9	Структурные перестройки в донных сообществах	0.0	0.0	0.0	2.0	3.0	14.0	16.0	13.0	55.0	228.0	446.0	582.0	1324.0	
V10	Климатические изменения в прибрежной зоне Азовского моря	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
V11	Гидрометеорологические явления	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
V12	Антропогенное воздействие	0.0	0.0	0.0	1.0	3.0	-4.0	-21.0	-32.0	-21.0	-99.0	-401.0	-806.0	-1077.0	
V13	Уровень воды в водохранилище, площадь акватории	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
V14	Абразия берегов, твердый сток Дона	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	-2.0	5.0	22.0	33.0	22.0	100.0	402.0	807.0	
V15	Опасные природные явления в прибрежной зоне	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0

Окончание табл. 4.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
V16	Гипоксия, аноксия, заморы	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	2.0	1.0	-1.0	11.0	25.0	35.0	36.0	128.0
V17	Потребление кислорода при разложении органического вещества	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	2.0	1.0	13.0	27.0	37.0
V18	Оседание на дно отмерших клеток фитопланктона	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	2.0	1.0	13.0	27.0	37.0
V19	Массовая гибель синезеленых водорослей	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	2.0	1.0	13.0	27.0	37.0	38.0
V20	Мутность воды	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	-2.0	5.0	22.0	33.0	22.0	100.0	402.0
V21	Интенсивное цветение воды	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	2.0	1.0	13.0	27.0	37.0	38.0	130.0
V22	Поступление в водоем дополнительного органического вещества (вторичное загрязнение)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-2.0	-1.0	4.0	1.0	0.0	12.0	26.0	36.0
V23	Гидробионты, оставшиеся на берегу	0.0	0.0	0.0	0.0	-2.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0
V24	Площади, занимаемые зообентосом	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
V25	Наиболее продуктивные супралиторальные сообщества	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
V26	Малоподвижные крупные особи зообентоса	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
V27	Метеорологические условия	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
V28	Гидрохимические условия водоемов	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
V29	Гидробиологические условия	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
V30	Гидрологические условия	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
V31	Площади мелководий	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
V32	Заиление дна	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	-2.0	5.0	27.0	35.0	23.0	113.0	429.0
V33	Инвазия экзотических видов	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	3.0	14.0	16.0	13.0	55.0	228.0	446.0	582.0
V34	Автохтонные виды	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-2.0	-2.0	-13.0	-15.0	-12.0	-54.0	-227.0	-445.0

БЕНТОС 16.05.2020 ДВУХУРОВНЕВЫЙ

- Климатические изменения в прибрежной зоне Азовского моря
- · — · — Таксономическая структура макрозообентоса бассейна Азовского моря
- - - Структурные перестройки в донных сообществах
- Антропогенное воздействие
- Абразия берегов, твердый сток Дона
- - - Гипоксия, аноксия, заморы
- · · · · Наиболее продуктивные супралиторальные сообщества
- · · · · Автохтонные виды

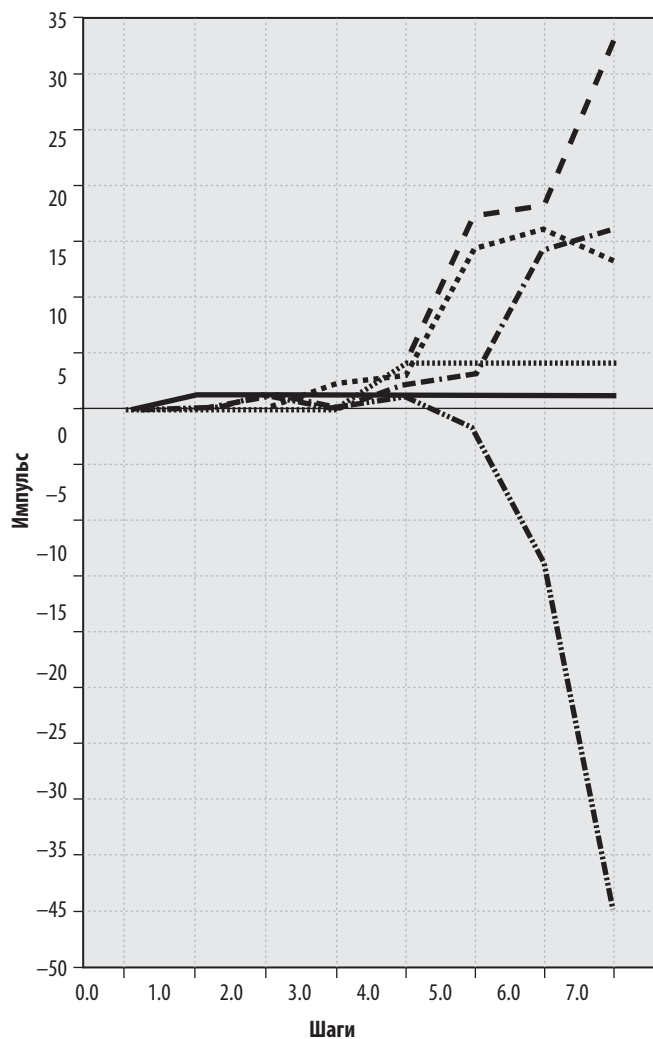


(а)

Рис. 4.13. Графики импульсных процессов по сценарию $q_{10} = +1$ (а), (б)

БЕНТОС 16.05.2020 ДВУХУРОВНЕВЫЙ

- Климатические изменения в прибрежной зоне Азовского моря
- Риски
- - - Ресурсы
- · · · · Структурные перестройки в донных сообществах
- · · · · Опасные природные явления в прибрежной зоне
- · · · · Инвазия экзотических видов



(б)

Как следует из рисунка 4.13а, наличие климатических изменений влечет за собой изменения таксономической структуры макробентоса Азовского моря. Одновременно возникают структурные изменения в донных сообществах, которые в свою очередь связаны с замором рыбы. Все перечисленные изменения параметров нарастают. При этом величина интегрального параметра, характеризующего автохтонные изменения бентоса, уменьшается. Это в свою очередь компенсирует состояние гидроэкосистемы и снижает антропогенную активность, так как состояние макрозообентоса стабилизируется за счет взаимного влияния параметров гидроэкосистемы друг на друга.

На рисунке 4.13б показан пример импульсного сценария изменения рисков наступления опасного природного процесса в зависимости от величины климатических изменений в прибрежной зоне Азовского моря, структурных перестроек в донных сообществах и инвазии экзотических видов. Как следует из графиков, при одновременном наступлении климатических изменений, наличии структурных перестроек в донных сообществах и увеличении инвазии экзотических видов риски увеличиваются.

4.4.3 | Разработка когнитивной карты третьего уровня IG3

С учетом анализа данных о биологическом мониторинге, а также метеорологических и гидрологических параметров, измеряемых на базах ЮНЦ РАН, была построена иерархическая когнитивная карта третьего уровня, которая называется «Глубинные структурные изменения в гидроэкосистеме Понто-Каспийского региона». Установление причинно-следственных связей между параметрами биологического и гидрологического мониторинга происходило по данным экспертов, теоретическим и экспериментальным сведениям с учетом отбора данных о биологическом мониторинге в ЮНЦ РАН (базы «Маньч» и «Донской»).

В таблице 4.4 приведено описание вершин когнитивной карты IG3, которые связаны с видовым составом и биоразнообразием бентоса и численностью и биомассой зообентоса. Эти показатели являются интегральными параметрами, характеризующими глубинные изменения в состоянии экосистемы. В зависимости от изменений данных параметров можно сделать вывод, находится ли экосистема в равновесии, несмотря на различные изменения у отдельных видов бентоса, либо экосистема вошла в стадию цикла глубинных изменений.

Таблица 4.4

Вершины когнитивной карты IG3 «Глубинные структурные изменения в гидроэкосистеме Понто-Каспийского региона»

Код	Наименование вершины
V1.1	Глубинные изменения в экосистеме
V1.2	Наступление опасного явления
V1.3	Система сохраняет равновесие
V2	Внешние факторы
V2.1	Метеорологические явления
V2.1.1	Атмосферное давление
V2.1.2	Ветровая активность
V2.1.3	Осадки
V2.1.4	Температура воздуха текущая
V2.2	Гидрологические показатели
V2.2.1	Гидрометеорологические показатели
V2.2.1.1	Ледовитость
V2.2.1.2	Объем стока
V2.2.1.3	Температура воды текущая
V2.2.1.4	Уровень воды
V2.2.1.5	Среднегодовая температура воды
V2.2.1.6	Среднегодовая температура воздуха
V2.2.1.7	Среднегодовая сумма атмосферных осадков
V2.2.1.8	Среднегодовая скорость ветра
V2.2.2	Гидрохимические показатели
V2.2.2.1	Соленость текущая
V2.2.2.2	Минерализация
V2.2.2.3	Биогенная нагрузка
V2.2.2.4	Среднегодовая соленость
V2.2.3	Гидробиологические показатели
V2.2.3.1	Площадь расселения донных сообществ
V2.2.3.2	Площадь цветения
V2.2.3.3	Биомасса рыбы
V2.2.3.4	Первичная продукция
V2.2.3.5	Среднегодовая биомасса и численность бентоса
V3	Антропогенная активность
V3.1	Действия экспертов
V3.2	Информационная активность пользователей

Вершина V1.1 «Глубинные изменения в экосистеме». Целевая вершина, состояние которой отслеживается с учетом всех взаимосвязей между другими вершинами. Считаем, что наличие глубинных изменений в экосистеме является предпосылкой для возникновения опасных природных процессов. Поэтому с помощью когнитивного анализа рассматриваем сценарии, в которых разными путями можно определить взаимосвязь между различными параметрами экосистемы, путем воздействия на которые можно компенсировать воздействие на вершину V1.1 в случае опасных природных явлений, например вариациями антропогенной активности.

Вершина V1.2 «Наступление опасного явления». Рассматриваемая вершина содержит данные о происходящем опасном природном явлении. Согласно ГОСТ Р 22.0.03-95 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Природные чрезвычайные ситуации. Термины и определения» (принят и введен в действие постановлением Госстандарта РФ от 25 мая 1995 г. № 267), к опасным природным явлениям, происходящим в Понто-Каспийском регионе, можно отнести следующие:

Опасные гидрологические явления:

- наводнение – затопление территории водой, являющееся стихийным бедствием;
- затопление – покрытие водой днища долины или территории, прилегающей к реке;
- подтопление – комплексный гидрогеологический процесс, при котором в результате изменения водного режима и баланса территории происходят повышения уровней (напоров) подземных вод и/или влажности грунтов, превышающие принятые для данного вида застройки критические значения и нарушающие необходимые условия строительства и эксплуатации объектов;
- зажор – скопления шуги с включением мелкобитого льда в русле реки, вызывающее стеснение водного сечения и связанный с этим подъем уровня воды.

Опасные метеорологические явления:

- сильный ветер – движение воздуха относительно земной поверхности со скоростью или горизонтальной составляющей свыше 14 м/с;
- ураган – ветер разрушительной силы и значительной продолжительности, скорость которого превышает 32 м/с;
- шторм – длительный очень сильный ветер со скоростью свыше 20 м/с, вызывающий сильные волнения на море и разрушения на суше;

- шквал – резкое кратковременное усиление ветра до 20–30 м/с и выше, сопровождающееся изменением его направления, связанное с конвективными процессами;
- гроза – атмосферное явление, связанное с развитием мощных кучево-дождевых облаков, сопровождающееся многократными электрическими разрядами между облаками и земной поверхностью, звуковыми явлениями, сильными осадками, нередко с градом;
- продолжительный дождь – жидкие атмосферные осадки, выпадающие непрерывно или почти непрерывно в течение нескольких суток, могущие вызвать паводки, затопление и подтопление;
- ливень – кратковременные атмосферные осадки большой интенсивности, обычно в виде дождя или снега;
- гололед – слой плотного льда, образующийся на земной поверхности и на предметах при намерзании переохлажденных капель дождя или тумана;
- туман – скопление продуктов конденсации в виде капель или кристаллов, взвешенных в воздухе непосредственно над поверхностью земли, сопровождающееся значительным ухудшением видимости;
- засуха – комплекс метеорологических факторов в виде продолжительного отсутствия осадков в сочетании с высокой температурой и понижением влажности воздуха, приводящий к нарушению водного баланса растений и вызывающий их угнетение или гибель;
- пыльная буря – перенос больших количеств пыли или песка сильным ветром, сопровождающийся ухудшением видимости, выдуванием верхнего слоя почвы вместе с семенами и молодыми растениями, засыпанием посевов и транспортных магистралей;
- степной пожар – естественно возникающие или искусственно вызываемые палы в степях.

Вершина V1.3 «Система сохраняет равновесие». Вершина подгруппы «V1». В эту вершину объединены разные не поддающиеся классификации явления и процессы, обусловленные антропогенным и природным происхождением, в совокупности своей влияющие на устойчивое равновесие экосистемы.

Вершина V2 «Внешние факторы». Чтобы правильно и аргументированно оценить влияние этой вершины на главную вершину V1, было рассмотрено множество вершин. Подгруппа вершины V2:

V2.1 «Метеорологические явления». Вершина является базисной, возмущающей, регулирующей, индикаторной. Сюда относятся неблагоприят-

ные метеорологические явления, которые не несут непосредственной угрозы для жизни и здоровья населения, а также приносят незначительные материальные убытки. Также в эту подгруппу отнесены по критерию природного происхождения обычные метеорологические явления.

V2.1.1 «Атмосферное давление». Вершина является базисной, возмущающей, регулирующей, индикаторной.

V2.1.2 «Ветровая активность». Вершина является базисной, возмущающей, индикаторной. На рисунке 4.14 показана схема общей циркуляции атмосферы.

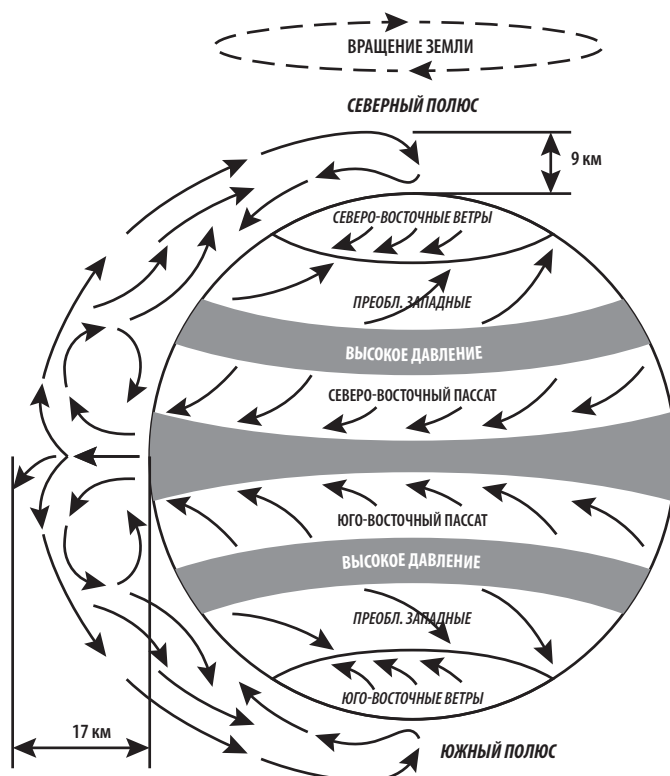


Рис. 4.14. Схема общей циркуляции атмосферы

Ряд авторов дают такое образное описание: вся планета Земля представляет собой закрытую комнату, поэтому, если где-то происходит «открытие форточки» или «окна», то вся воздушная масса в комнате приходит в движение. Поэтому эта вершина представляет интерес в дальнейших исследованиях, в частности выявление неочевидных закономерностей между остальными вершинами когнитивной карты.

V2.1.3 «Осадки». Вершина является базисной, возмущающей, регулирующей, индикаторной.

V2.1.4 «Температура воздуха текущая». Вершина является базисной, возмущающей, регулирующей, индикаторной.

V2.2 «Гидрологические параметры». Вершина является базисной, возмущающей, регулирующей, индикаторной. Подгруппа вершин, объединяющая параметры экосистемы, связанные непосредственно с водой.

V2.2.1 «Гидрометеорологические параметры». Вершина является базисной, возмущающей, регулирующей, индикаторной. К данной подгруппе вершин относятся:

- V2.2.1.1 «Ледовитость». Вершина является базисной, возмущающей, регулирующей, индикаторной. Данный параметр был отобран по причине того, что это характерное явление для Понто-Каспийского региона. Например, регулярно встречающиеся зазоры.
- V2.2.1.2 «Объем стока». Вершина является базисной, возмущающей, регулирующей, индикаторной. Здесь учитывается и наблюдается изменение объема стока рек. Существует четкая связь с количественными и качественными показателями бентоса.
- V2.2.1.3 «Температура воды текущая». Вершина является базисной, возмущающей, регулирующей, индикаторной. Здесь рассматривается и отслеживается изменение температуры воды в реальном времени.
- V2.2.1.4 «Уровень воды». Вершина является базисной, возмущающей, регулирующей, индикаторной. Отслеживается и наблюдается изменение уровня воды в реках и крупных водоемах Понто-Каспийского региона.
- V2.2.1.5 «Среднегодовая температура воды». Вершина является базисной, возмущающей, регулирующей, индикаторной. Здесь отслеживается и наблюдается изменение среднегодовой температуры воды.
- V2.2.1.6 «Среднегодовая температура воздуха». Вершина является базисной, возмущающей, регулирующей, индикаторной.
- V2.2.1.7 «Среднегодовая сумма атмосферных осадков». Вершина является базисной, возмущающей, регулирующей, индикаторной.
- V2.2.1.8 «Среднегодовая скорость ветра». Вершина является базисной, возмущающей, регулирующей, индикаторной.

V2.2.2 «Гидрохимические показатели». Вершина является базисной, возмущающей, регулирующей, индикаторной.

- V2.2.2.1 «Соленость текущая». Вершина является базисной, возмущающей, регулирующей, индикаторной.

- V2.2.2.2 «Минерализация». Вершина является базисной, возмущающей, регулирующей, индикаторной.
- V2.2.2.3 «Биогенная нагрузка». Вершина является базисной, возмущающей, регулирующей, индикаторной. Более подробная связь отражена в п. 1.1 как интегральный качественный показатель бентоса.
- V2.2.2.4 «Среднегодовая соленость». Вершина является базисной, возмущающей, регулирующей, индикаторной.

V2.2.3 «Гидробиологические показатели». Вершина является базисной, возмущающей, регулирующей, индикаторной.

- V2.2.3.1 «Площадь расселения донных сообществ». Вершина является базисной, возмущающей, регулирующей, индикаторной.
- V2.2.3.2 «Площадь цветения». Вершина является базисной, возмущающей, регулирующей, индикаторной.
- V2.2.3.3 «Биомасса рыбы». Вершина является базисной, возмущающей, регулирующей, индикаторной.
- V2.2.3.4 «Первичная продукция». Вершина является базисной, возмущающей, регулирующей, индикаторной.
- V2.2.3.5 «Среднегодовая биомасса и численность бентоса». Вершина является базисной, возмущающей, регулирующей, индикаторной.

Вершина V3 «Антропогенная активность». Вершина является базисной, возмущающей, регулирующей, индикаторной. Эта вершина объединяет в себе действия разных ведомств и непосредственно жителей по устранению последствий опасных явлений или методам борьбы с ними. Основная цель – сохранение жизни всех участников экосистемы. Вес этой вершины непостоянный, он меняется в разных сценариях экспериментов когнитивного анализа.

V3.1 «Действия экспертов». Вершина является базисной, возмущающей, регулирующей, индикаторной. Здесь рассматриваются и учитываются мнения и действия экспертов той или иной области, в зависимости от происходящего опасного явления. Вес вершины аналогично предыдущей рассматривается в диапазоне, меняется в разных сценариях экспериментов когнитивного анализа.

V3.2 «Информационная активность пользователей». Вершина является базисной, возмущающей, регулирующей, индикаторной. Для оценки веса этой вершины спроектированной когнитивной карты был проведен анализ социальной активности пользователей во время опасного явления, а именно социальных сетей, с помощью программы IQbuzz.

Правильный выбор вершин согласуется с экспертами, осуществляющими все виды мониторинга по стандартным методикам, что подтверждается публикациями в открытой печати (см. раздел 4.1.1). Такой анализ позволяет построить когнитивную карту и дать одновременную оценку совокупного влияния различных параметров на величину глубинных изменений состояния экосистемы.

При наличии глубинных изменений в состоянии экосистемы по анализу поведения бентоса как интегрального показателя можно сделать прогноз о вероятности наступления опасного природного явления при одновременных существенных изменениях гидрологических (гидрометеорологических, гидробиологических и гидрохимических) функциональных параметров.

4.4.4 | Описание программного модуля преобразования данных мониторинга природных явлений в прибрежных зонах в формат когнитивной имитационной модели экосистемы

Для разработанной модели когнитивного анализа было создано программное обеспечение CMSS, которое позволяет преобразовывать данные мониторинга параметров экосистемы, которые могут содержать информацию об опасных природных процессах, в формат когнитивной имитационной модели гидроэкосистемы (или экосистемы юга России).

Модуль обмена данными с внешними источниками позволяет осуществлять экспорт и импорт данных для построения карты и проведения моделирования в/из текстового файла в формате CSV (от англ. Comma-Separated Values – значения, разделенные запятыми или точкой с запятой, – текстовый формат, предназначенный для представления табличных данных) определенной структуры в формат программы когнитивного анализа для ЭВМ, регистрационный номер 2018661506 от 07.09.2018 [Программа ... 2018].

Для создания файла необходимо открыть/составить соответствующую карту и в меню «Файл» нажать «Экспорт CSV». При этом откроется окно, в котором нужно выбрать место для сохранения файла на диске. Затем нажать кнопку «Сохранить».

Для загрузки данных из внешнего источника необходимо в меню «Файл» нажать «Импорт CSV» и в появившемся окне выбора файла выбрать нужный файл с локального диска. В результате этого данные

текущей карты обновятся или для новой карты (пустой) будет построена карта в соответствии с данными из файла.

Файл имеет следующую структуру:

- 1-я строка** – Заголовок “Vertices data” – секция вершин
- 2-я строка** – Заголовки полей данных вершин – “ID, X, Y, Short, Fullname, Val, Growth, Color”
 - ID – идентификатор вершины (linuxtimestamp)
 - X, Y – координаты вершины на карте
 - Short – короткое имя вершины
 - Fullname – полное имя вершины
 - Val – значение вершины
 - Growth – величина импульса вершины (для имп. процесса обычно 0)
 - Color – цвет вершины в формате hex – RGBA (0xAABBCCFF)

Последующие строки – соответствующие данные по каждой вершине (1 строка – 1 вершина).

До строки с заголовком “Edgesdata” – начало следующей секции связей.

После этого заголовка идет строка с заголовком таблицы и короткими названиями всех вершин (входов). Например “In/Out, V1, V2, V3, V4, V5” – 5 вершин.

Затем в каждой следующей строке следуют ее связи с каждой вершиной, пустое поле – отсутствие связи, число в поле – величина связи. Например “V1, , 1.0, , ,” показывает наличие связи от вершины V1 к вершине V2 величиной 1.0. И так до конца файла. На рисунке 4.15 показан вид файла CSV в текстовом редакторе, на рисунке 4.16 – в редакторе таблиц.

Одним из источников данных для построения когнитивной имитационной модели экосистемы являются метеорологические данные. Эти данные собираются с использованием обширного набора сенсорных устройств соответствующими метеорологическими организациями. Среди отечественных организаций можно выделить такие, как Гисметео, Яндекс. Погода, ООО «Расписание Погоды» (rp5.ru), freemeteo.ru, gridforecast.com, aisorimeteo.ru, hmn.ru, а среди зарубежных – OpenWeather, Weatherbit, AccuWeather, worldweatheronline. Доступ к данным эти сервисы предоставляют по сети Интернет с помощью собственных программных интерфейсов (API – application programming interface). Либо через сайт напрямую, при этом необходимо указать параметры выборки.

```

Vertices data
ID, X, Y, Short, Full name, Val, Growth, Color
1584447328774,231.0,112.0,V1,"Вершина
1",0.0,0.0,0x808080ff
1584447329395,351.0,43.0,V2,"Вершина 2",0.0,0.0,0x808080ff
1584447331292,472.0,96.0,V3,"Вершина 3",0.0,0.0,0x808080ff
1584447332043,420.0,238.0,V4,"Вершина
4",0.0,0.0,0x808080ff
1584447334051,276.0,224.0,V5,"Вершина
5",0.0,0.0,0x808080ff
Edges data
In/Out,V1,V2,V3,V4,V5
V1,,1.0,,,
V2,,,1.0,,
V3,,,1.0,
V4,,,,1.0
V5,1.0,,,
    
```

Рис. 4.15. Вид файла CSV в текстовом редакторе

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Vertices data							
2	ID	X	Y	Short	Full name	Val	Growth	Color
3	1584447328774	231	112	V1	Вершина 1	0	0	0x808080ff
4	1584447329395	351	43	V2	Вершина 2	0	0	0x808080ff
5	1584447331292	472	96	V3	Вершина 3	0	0	0x808080ff
6	1584447332043	420	238	V4	Вершина 4	0	0	0x808080ff
7	1584447334051	276	224	V5	Вершина 5	0	0	0x808080ff
8	Edges data							
9	In/Out	V1	V2	V3	V4	V5		
10	V1		1					
11	V2			1				
12	V3				1			
13	V4					1		
14	V5							

Рис. 4.16. Вид файла CSV в редакторе таблиц

Для примера (см. рис. 4.17) получения данных возьмем архив наблюдений за морем в г. Таганроге за период с 16.04.2014 по 16.05.2014 с сайта rp5.ru по ссылке https://rp5.ru/Архив_наблюдений_за_морем_в_Таганроге, на котором интерфейс сайта позволяет получить эти данные в виде таблицы за соответствующий период. Объединив эти данные, можно рассчитать, что величина значения в вершине «Ветер» для текущей точки отсчета моделирования = 2.53.



Рис. 4.17. Пример данных из архива наблюдений за морем в Таганроге

Другой пример (рис. 4.18) – через API компании gridforecast.com для координат по г. Таганрогу (38.896881; 47.236172) можно получить следующие данные по скорости ветра в формате JSON (заменив YOUR_TOKEN на ваш ключ, выдаваемый при регистрации, ссылка: https://gridforecast.com/api/v1/statistics/speed10/38.896881;47.236172?api_token=YOUR_TOKEN).

```
{
  "0": 1, "1": 8, "2": 15, "3": 20, "4": 18, "5": 15, "6": 10, "7": 6, "8": 3, "9": 2,
  "10": 1, "11": 0, "12": 0, "13": 0, "14": 0, "15": 0, "16": 0, "17": 0, "average": 4,
  "maximum": 17, "prevalent": 3
}
```

Рис. 4.18. Результат API gridforecast.com в формате JSON

С ресурса «Специализированные массивы для климатических исследований» данные предоставляются в текстовом файле за все время наблюдений. Следующим образом (рис. 4.19) выглядят данные по г. Таганрогу (станция 34720) по месяцам на 2016 год по температуре воздуха.

54801	2016	4.3	5.8	6.8	8.6	12.1	12.9	13.1	12.4
34720	2016	4.3	6.7	7.8	11.0	14.7	17.9	18.1	18.0
34750	2016	4.4	6.2	7.1	9.1	12.1	14.2	15.2	12.7

Рис. 4.19. Архив данных в формате tab

С агрегировав эти данные, можно получить, что величина значения в вершине «Температура» для текущей точки отсчета моделирования = 10,7.

4.4.5 | *Пример мониторинга и прогнозирования опасных природных процессов на основе анализа состояния сообществ зообентоса под действием антропогенных и климатических факторов, в том числе экстремальных условий окружающей среды*

В результате проведенных исследований были определены данные, касающиеся наличия причинно-следственных связей между вершинами когнитивной карты, матрица отношений.

Был проведен анализ устойчивости к возмущениям и анализ циклов и структурной устойчивости системы. То есть были определены взаимосвязи между гидрологическими, метеорологическими и гидробиологическими параметрами экосистемы в прибрежной зоне Азовского моря как части Понто-Каспийского региона (что соответствует различным циклам на когнитивной карте). Проведен анализ взаимного влияния интегральных показателей бентоса и других параметров друг на друга (то есть проанализирован импульсный сценарий). Для этого в рамках системы мониторинга и прогнозирования опасных природных процессов была разработана модель когнитивного моделирования, метод и алгоритмы создания когнитивных карт для описания параметров гидросистем. Результаты работы модели были проверены с помощью программы CMSS. Данные моделирования включали в себя анализ качественных и количественных показателей бентоса и установление взаимосвязей между различными параметрами гидроэкосистемы Азовского моря. Разработка когнитивной модели гидросистемы Азовского моря как части Понто-Каспийского региона производилась на основании теоретических данных об экосистемах, опросов экспертов, анализа статистических данных. Была разработана и исследована когнитивная модель «Глубинные структурные изменения в гидроэкосистеме Понто-Каспийского региона».

В таблице 4.4 (см. с. 137) представлены вершины когнитивной модели, отобранные в результате анализа информации о прибрежной зоне Азовского моря.

На рисунке 4.20 показан пример и результаты анализа одного из циклов разработанной когнитивной модели, показывающие связь между гидрологическими параметрами (среднегодовая соленость, среднегодовая температура воды, объем стока) и гидробиологическими параметрами (видовой состав и биоразнообразие донных сообществ, среднегодовая масса и численность бентоса), а также уровня социальной активности пользователей соцсетей и экспертов. Взаимосвязи носят эмпирический характер и служат для проверки сценариев импульсного воздействия на одну или несколько вершин и их взаимного отклика.

Анализ циклов когнитивной модели показал, что анализируемая система структурно неустойчива.

Таким образом, при изменении качественных и количественных показателей бентоса, таких как среднегодовая биомасса, численность и видовой состав и биоразнообразие бентоса, можно подтвердить факт наступления глубинных долгосрочных изменений в экосистеме Понто-

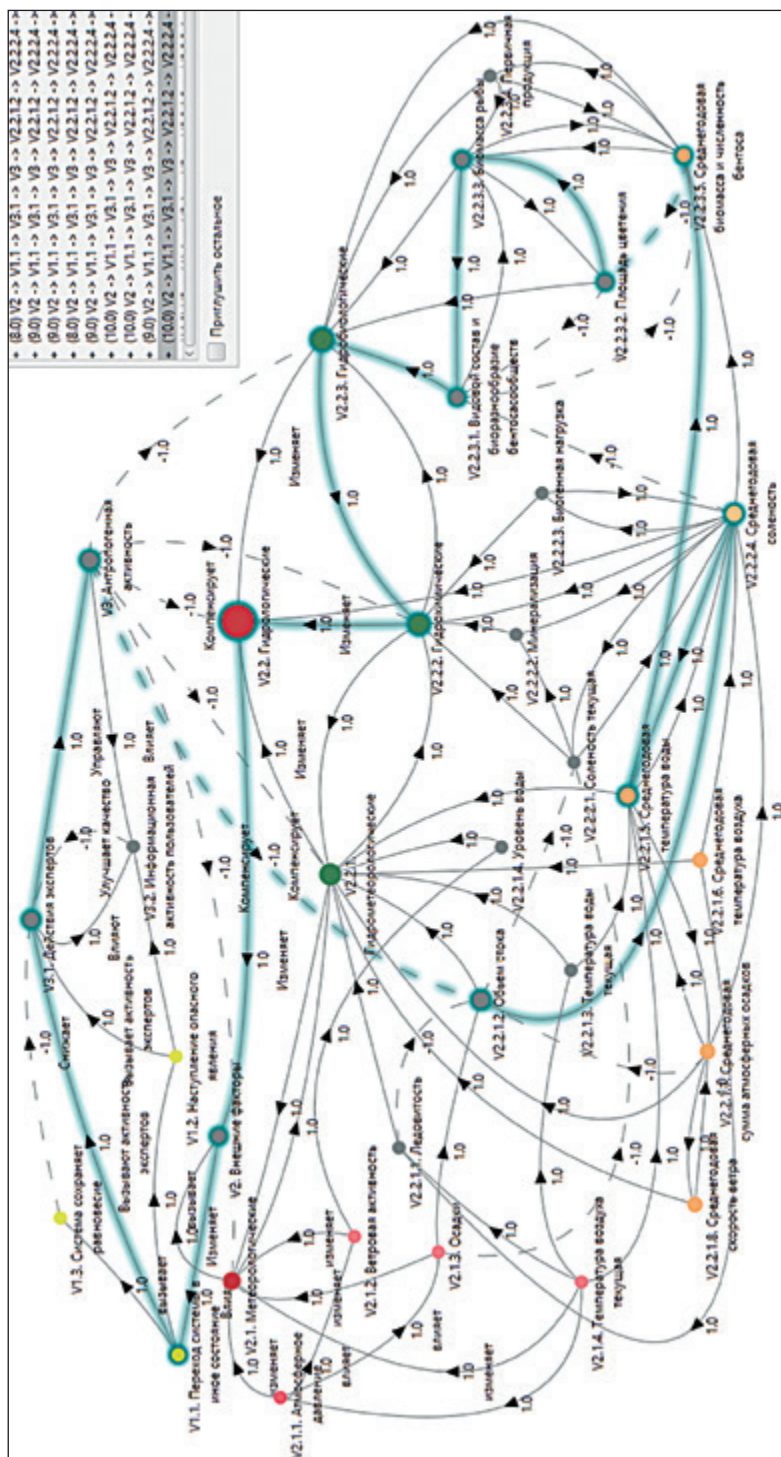


Рис. 4.20. Анализ циклов когнитивной модели с выделением одного из положительных циклов модели

Глубинные структурные изменения в гидросистеме Понто-Каспийского региона.
Сценарий: изменение качественных и количественных показателей бентоса

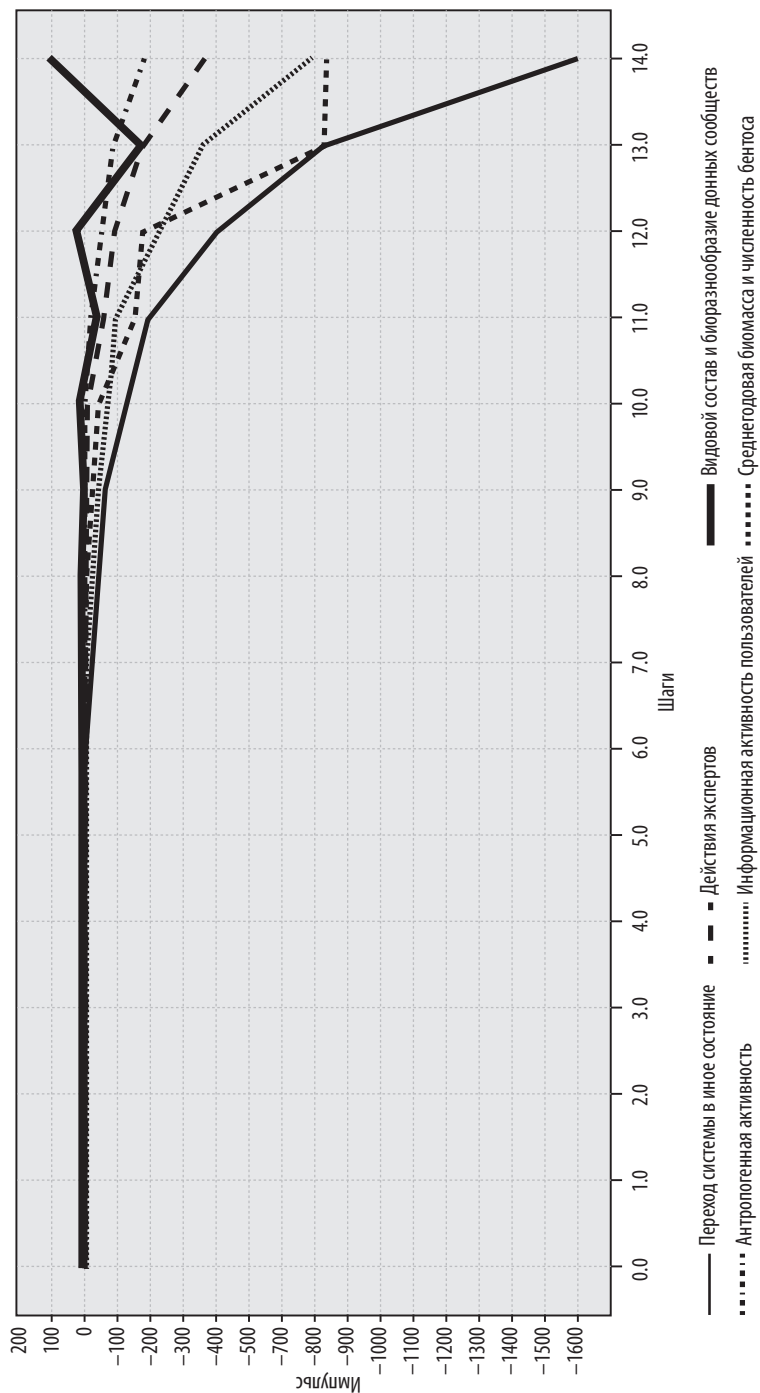


Рис. 4.21. Графики импульсных процессов

Каспийского региона. Наличие таких глубинных изменений в экосистеме Понто-Каспийского региона было установлено в те же самые временные периоды, когда наблюдалось такое опасное явление, как катастрофическое наводнение в Таганрогском заливе и дельте Дона 24 сентября 2014 г., сопровождающееся ураганными юго-западными и южными ветрами, достигавшими скорости 38 м/с, и экстремальный сгон в реке Дон и Азовском море 15–26 ноября 2019 г. На основании проведенного когнитивного анализа можно говорить о том, что вероятность наступления опасного явления при наличии глубинных изменений в экосистеме возрастает.

При разработке модуля когнитивного моделирования были решены вопросы, связанные как со сбором, объединением различных типов данных, так и с организацией подсистемы помощи принятия решений, реализованной на основе когнитивного анализа за счет применения технологий цифровой экономики. Так, метод сбора, обработки и хранения данных при когнитивном моделировании реализован на основании ранее разработанного авторами метода обработки и передачи информации для различных систем применения [Orda-Zhigulina et al., 2019; Мельник и др., 2019б].

Отличительной особенностью разработанного метода когнитивного моделирования является реализация структуры хранения данных блокчейн, и в частности ее особенность в виде наличия хеш-функций предыдущего блока. Также для сбора, обработки и хранения данных о различных параметрах гидроэкосистемы Азовского моря и об информационной активности пользователей социальных сетей в связи с опасными природными процессами применяются технологии «цифровой экономики»: большие данные, технологии беспроводной связи, системы распределенного реестра, промышленный интернет (интернет вещей), – которые обеспечивают возможность интеграции разработанного модуля когнитивного моделирования в системы помощи принятия решений, его масштабируемость и устойчивость к недетерминированным изменениям структуры за счет применения технологии распределенного реестра, а также возможность обработки большого потока слабоструктурированных данных (например, ретроспективных данных о состоянии экосистемы Понто-Каспийского региона), поступающих из различных источников. Проблема обработки таких больших объемов может быть решена с помощью реализации подсистемы помощи поддержки принятия решений как децентрализованной и с применением таких технологий, как

«туманные» и «облачные» вычисления [Мельник и др., 2019а, б; Melnik et al., 2019; Orda-Zhigulina et al., 2019].

Разработанная модель имеет наглядный графический интерфейс, для которого в явном виде представлены связи между различными параметрами гидроэкосистемы Понто-Каспийского региона, как метеорологическими, так и гидрологическими (уровень стока, соленость, ледовитость, скорость ветра, температура воздуха, интегральные параметры бентоса и др.). Реализована возможность построения когнитивной карты и анализа циклов и импульсных процессов при изменении одного из параметров системы.

Итак, авторами был разработана модель когнитивного моделирования и проведено моделирование глубинных структурных изменений в экосистеме при изменении качественных и количественных показателей. В результате моделирования установлены взаимосвязи между видовым составом и биоразнообразием донных сообществ, среднегодовой биомассой и численностью бентоса, уровнем антропогенного воздействия, реакцией экспертов, информационной активностью пользователей соцсетей, гидрологическими параметрами (среднегодовая соленость, объем стока и др.). Была установлена степень взаимного влияния различных параметров друг на друга и связь изменения параметров с глубинными структурными изменениями гидроэкосистемы Понто-Каспийского региона. Выводы когнитивного анализа были подтверждены результатами, полученными на основании проведенного типового биологического мониторинга в период с 2008 по 2019 г. Разработанная модель может быть интегрирована в децентрализованные интеллектуальные системы мониторинга и прогнозирования опасных природных процессов в части автоматизированной помощи принятия решений за счет применения технологии распределенного реестра. Основным преимуществом разработанной модели для системы когнитивного моделирования является возможность объединения различных данных о параметрах гидроэкосистемы Понто-Каспийского региона, а также удобное графическое представление выявленных как прямых (интегральных показателей бентоса, величины стока, среднегодовой солености и т.д.), так и неочевидных взаимосвязей и взаимного влияния параметров гидроэкосистемы с помощью когнитивных карт.

Для проверки адекватности разработанной модели когнитивного моделирования был реализован прототип компонента подсистемы поддержки принятия решений – модуль когнитивного анализа, который обеспечи-

ваает поддержку принятия управленческих решений при выполнении мониторинга и прогнозирования на основе анализа состояния сообществ зообентоса под действием антропогенных и климатических факторов, в том числе экстремальных условий окружающей среды. Разработанный прототип позволяет за счет применения технологий «цифровой экономики» собирать и учитывать широкую номенклатуру параметров о состоянии гидроэкосистем.

Прототип модуля когнитивного анализа позволяет определять связь современного состояния популяций макрозообентоса с глубинными перестройками в экосистеме на примере системы «Нижний Дон → Таганрогский залив → Азовское море» при одновременной оценке большого числа гидрологических и метеорологических параметров. Изменение индикаторных параметров может дать информацию о наступлении глубинных изменений в экосистеме, что делает систему более уязвимой к реакции на опасные природные процессы, которые связаны с кратковременными действующими факторами (ураганы, сгонно-нагонные явления и т.д.). Наличие глубинных структурных изменений в экосистеме позволяет качественно анализировать силу и вероятность наступления опасного природного процесса. В разработанном прототипе структурируются различные параметры гидроэкосистемы и формируется целостное представление о состоянии природной среды. Закономерности экосистемных процессов Таганрогского залива, дельты Дона и Азовского моря отражены в виде ориентированных графов с вершинами, обладающими различным весом, что позволяет в строгой математической форме отразить очевидные и неочевидные взаимосвязи между параметрами гидроэкосистемы, которые в настоящее время изучаются традиционными методами мониторинга, а также определить их взаимное влияние друг на друга. Кроме того, в рамках реализации прототипа модуля когнитивного анализа был разработан модуль считывания данных с ресурса IQbuzz, данный модуль позволяет получать необходимые данные для работы подсистемы поддержки принятия решений непосредственно с интернет-ресурса.

Основные результаты, полученные в ходе разработки модели и прототипа модуля когнитивного анализа, апробированы на ведущих всероссийских и международных научных и научно-технических конференциях и опубликованы в ведущих научных изданиях.

Исследования по прогнозированию развития научно-технологической сферы РФ до 2030 г., проведенные Национальным исследовательским университетом «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ) [Долгосрочный прогноз ...], свидетельствуют о том, что в рамках приоритетного направления «Рациональное природопользование» развитие методов оценки природных и антропогенных изменений окружающей среды относятся к глобальным трендам, оказывающим существенное влияние на формирование новых рынков для инновационных видов продукции. Важнейшей составляющей в этой области является развитие информационно-научных технологий, в том числе создание новых систем мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды. Природные комплексы юга России уже длительное время изучаются представителями всех областей естественных наук. Однако сегодня требуется детальный анализ полученных данных, определение вектора свойств и механизмов функционирования наземных и морских экосистем юга России с учетом природных и антропогенных факторов, из которых климат, бесспорно, является самым мощным. Отмечающиеся на протяжении последних лет тенденции изменения климата вносят дополнительные требования к природопользованию и планированию экономической деятельности на юге России. С учетом перспектив строительства новых портовых сооружений в Приазовье актуальной задачей является исследование биокоррозии и биообрастания металлов в зоне смешения речных и морских вод в широком диапазоне гидроклиматических условий, т.к. действие коррозии существенно снижает безопасность эксплуатации оборудования и технических конструкций, приводя к более частому выходу из строя, и тем самым наносит большой урон промышленной безопасности. Подходы к решению данной проблемы должны базироваться на знании законов биологии,

химии, основ материаловедения, с учетом принципов рационального природопользования.

На сегодняшний день изучение биологической стойкости материалов к обрастанию является одной из важнейших материаловедческих задач, т.к. обрастание способствует увеличению скорости коррозии в 10–20 раз [Михеев, 2013; Шкабара, 2015]. В настоящее время для оценки стойкости материалов к биообрастанию и коррозии Всероссийским научно-исследовательским институтом авиационных материалов (ВИАМ) проводятся масштабные эксперименты [Каблов, 2015]. В ВИАМ осуществляют натурные морские испытания материалов и конструкций, отработывается методика испытания образцов в емкостях с морской водой при полном погружении [Варченко, Курс, 2017]. Изучением обрастаний занимались в лабораториях ведущих учреждений РАН: ИППЭЭ РАН, ЗИН РАН, ДВО РАН и др. Однако специальные работы по изучению сукцессии организмов-обрастателей на металлах в российском секторе Азовского моря в зоне смешения речных и морских вод ранее не проводились, поэтому целью проводимого исследования было выявление особенностей существования сообщества «неподвижного субстрата», которое формируется в устьевой области, где, как правило, наблюдаются наибольшие диапазоны и градиенты изменения абиотических факторов. Результаты, полученные по завершении эксперимента, в дальнейшем могут быть использованы для выработки практических рекомендаций по защите от обрастания в данном районе.

Наиболее доступным и распространенным методом изучения процессов формирования обрастания и коррозии являются стендовые испытания. 19 декабря 2018 г. в районе стационаров ЮНЦ РАН – Береговой научно-экспедиционной базы (БНЭБ) «Кагальник» (станция 1, протока Свиное Гирло) и гидрометеопоста (ГМП) «Донской» (станция 2, рукав Старый Дон) – на глубине 2 м были установлены 2 серии экспериментальных пластин площадью 15×15 см, изготовленных из алюминиевых сплавов марок АМгб и Д16 и углеродистых сталей марок 30ХГСА и Ст3. В качестве контрольных образцов, не склонных к обрастанию, использовались пластины из органического стекла марки АО-120 (нейтральный материал). Схема расположения станций представлена на рисунке 5.1.

Согласно схеме эксперимента, формирование сообществ обрастания на образцах наблюдали по истечении 1, 3, 6, 9 и 12 месяцев экспозиции.

Экспериментальные пластины, выставленные в водоем, после извлечения доставляли в контейнере с водой в лаборатории на БНЭБ «Кагаль-

ник» и ЮНЦ РАН для исследования методом оптической микроскопии и взятия образцов для гидробиологического анализа, проводившегося по общепринятой методике [Руководство ... 1983]. Идентификация и подсчет перифитонных инфузорий проводились немедленно в живом виде. Естественная подвижность живых простейших значительно облегчает поиск мельчайших животных, которых в фиксированных пробах не всегда легко выделить из сбившегося в хлопья мусора. Кроме того, инфузории при довольно разнообразных формах и скорости движения имеют в этом отношении хорошо заметные отличия от других организмов, что очень важно при необходимости быстрого подсчета. В этом случае достигается максимальная точность учета, так как исключаются потери, неизбежные при концентрации, фиксировании проб и связанные со сложностью поиска и идентификации мертвых и деформированных форм.

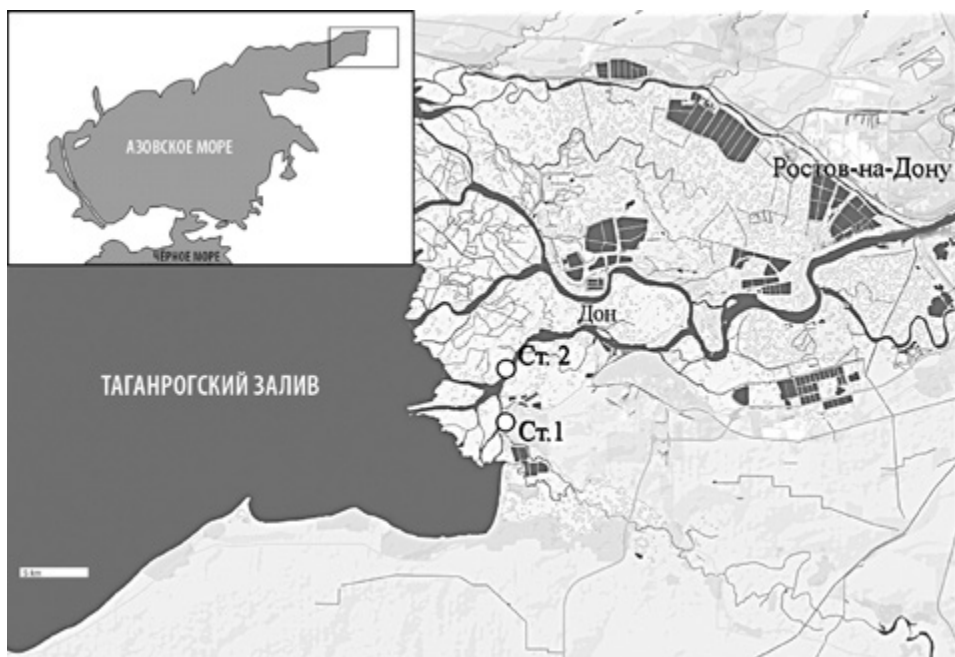


Рис. 5.1. Карта-схема отбора проб

В соответствии со схемой, разработанной Б.Т. Широм [Scheer, 1945], обрастания поверхности, погруженной в воду, начинаются с формирования на ней бактериальной пленки, на которую на второй стадии сукцессии оседают быстро растущие, а на третьей – медленно растущие

макрообрастели [Раилкин, 1998]. В большинстве работ, посвященных изучению динамики организмов-обрастателей, показано, что сукцессия макрообрастания – закономерный процесс, а ее конечная стадия, характеризующаяся стабильным видовым и численным составом, достигается в течение одного или нескольких лет. Однако в прибрежных сообществах климакс кратковременный и заканчивается разрушением сообществ под воздействием различных природных явлений (шторма, вымерзания в зимний период и т.д.) [Раилкин и др., 2004].

5.1. Формирование сообществ микроводорослей на экспериментальных пластинах

По истечении *одного месяца экспозиции* наиболее часто встречаемыми были представители перифитонной и бентосной флоры отдела Bacillariophyta родов *Navicula* Bory, 1822, *Staurosirella* Williams & Round, 1988, *Melosira* Agardh, 1824, *Cymbella* Agardh, 1830, *Ulnaria* (Kützing) Compère, 2001, *Amphora* Ehrenberg ex Kützing, 1844, *Diatoma* Bory, 1824, *Gomphonema* Ehrenberg, 1832, *Staurosira* Ehrenberg, 1843, *Surirella* Turpin, 1828, *Cymatopleura* Smith, 1851. Также были отмечены осевшие на пластины представители планктонной флоры (*Melosira varians* Agardh, *Aulacoseira granulata* (Ehrenberg) Simonsen, виды рода *Cyclotella* (Kützing) Brébisson, 1838). Число видов диатомовых водорослей на пластинах изменялось от 5 до 29. Меньшее количество видов и частота встречаемости были у водорослей из отделов Chlorophyta (7 видов), Cryptophyta (2 вида), Euglenophyta (1 вид) и Dinophyta (1 вид). Соскоб водорослей со стальных пластин показал незначительное количество фитообрастателей. Численность водорослей на таких пластинах варьировала от 2 до 17 кл/см², биомасса – от 0,005 до 0,04 мкг/см². Суммарные значения численности перифитонных водорослей одного месяца экспозиции пластин в водоеме составили 2–85 кл/см² (37 ± 29 кл/см²), биомассы – 0,005–0,2 мкг/см² ($0,09 \pm 0,07$ мкг/см²). Всего было отмечено 38 видов микроводорослей.

Спустя *три месяца* на пластинах продолжали доминировать диатомовые водоросли. Значительно увеличились их количественные показатели: частота встречаемости, количество видов, численность и биомасса. Основными представителями отдела Bacillariophyta были перифитонные, бентосные и планктонные виды родов *Navicula*, *Nitzschia* Hassall, 1845, *Diatoma*, *Cymbella*, *Melosira*, *Amphora*, *Thalassiosira* Cleve, 1873. Значения

численности перифитонных водорослей трех месяцев экспозиции пластинок в водоеме составили 116–2678 (959 ± 909 кл/см²), биомассы – 0,2–5,9 мкг/см² ($2,2 \pm 2,0$ мкг/см²), число видов изменялось от 17 до 31, общее количество таксонов рангом ниже рода увеличилось до 52. На стальных пластинах, на которых присутствовала ржавчина, значения биомассы были 1,05–1,18 мкг/см², численности – 387–488 кл/см².

Через *шесть месяцев экспозиции* на пластинах было отмечено резкое снижение численности до 26–145 кл/см² (средняя 70 ± 36 кл/см²) и биомассы до 0,05–0,4 мкг/см² (средняя $0,2 \pm 0,1$ мкг/см²) (рис. 5.2, 5.3), при этом доминирование сохранялось за диатомовыми водорослями. Изменяется видовой состав фитоперифитона. Происходит относительное снижение обилия прикрепленных диатомовых водорослей, которое, вероятно, вызвано воздействием интенсивного пресса фитофагов. Число видов на пластинах варьировало в диапазоне от 23 до 33 видов. Видовой список был пополнен такими планктонными водорослями из отдела Chlorophyta, как виды родов *Coelastrum* Nägeli, 1849, *Monoraphidium* Komárková-Legnerová, 1969, *Scenedesmus* Meyen, 1829, а также представителями Cyanobacteria: *Microcystis* Lemmermann 1907, *Planktothrix* Anagnostidis & Komárek, 1988, *Oscillatoria* Vaucher ex Gomont, 1892, и др. В пробах постоянно присутствовал 21 вид диатомовых водорослей.

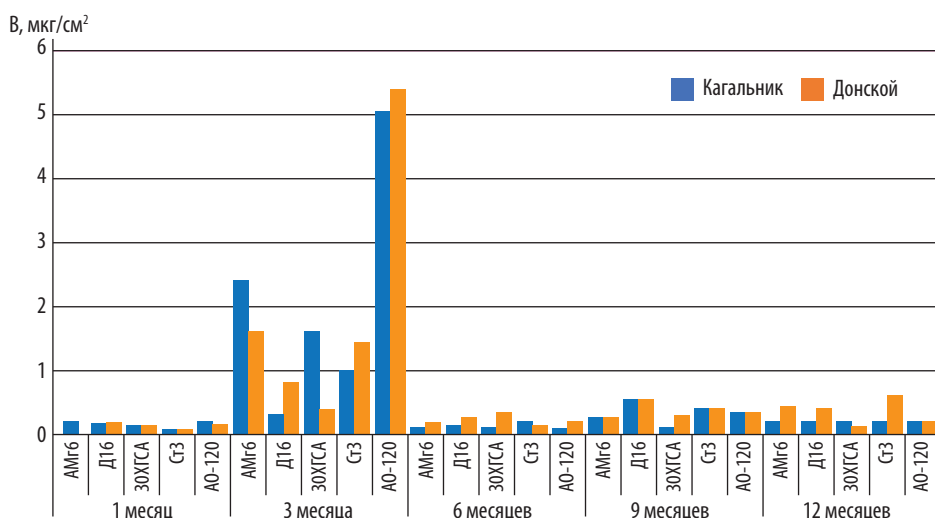


Рис. 5.2. Динамика биомассы микрофитоперифитона (В, мкг/см²) на экспериментальных пластинах нарастающего срока экспозиции

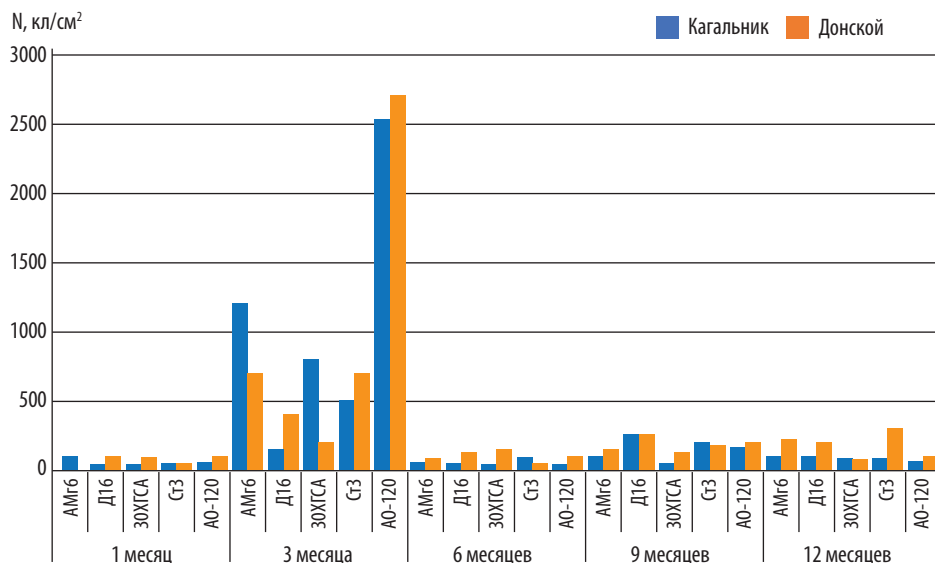


Рис. 5.3. Динамика численности микрофитоперифитона (N, кл/см²) на экспериментальных пластинах нарастающего срока экспозиции

После **девяти месяцев** экспозиции пластин в развитии фитоперифитона отмечали увеличение видового разнообразия микроводорослей из пяти отделов до 97 таксонов рангом ниже рода: число встреченных видов зеленых водорослей составило 36, диатомовых – 35, среди Cyanobacteria было отмечено 17 видов, из отдела Euglenophyta – 6 видов и 3 представителя Charophyta. Средние значения численности и биомассы при этом уменьшились до 153 ± 60 кл/см² ($32\text{--}235$ кл/см²) и до $0,4 \pm 0,3$ мкг/см² ($0,1\text{--}1,4$ мкг/см²). Основу количественных показателей составляли представители диатомовых водорослей за счет развития представителей родов *Gyrosigma* Hassall, 1845, *Haslea* Simonsen, 1974, *Navicula*, *Amphora*, *Thalassiosira* и видов *Cymatopleura solea* (Brébisson) Smith, *Nitzschia sigmoidea* (Nitzsch) Smith, *Pinnularia* sp., *Surirella brebissonii* Krammer & Lange-Bertalot, *Aulacoseira granulata*, *Tryblionella* cf. *gracilis* Smith, *Ulnaria ulna* (Nitzsch) Compère. Среди основных представителей отдела Chlorophyta были виды: *Binuclearia lauterbornii* (Schmidle) Proschkina-Lavrenko, *Coelastrum microporum* Nägeli, *Crucigenia tetrapedia* (Kirchner) Kuntze, *Monoraphidium contortum* (Thuret) Komárková-Legnerová, *Pediastrum duplex* Meyen, *Pseudopediastrum boryanum* (Turpin) Hegewald, виды родов *Scenedesmus*, *Tetraedron* Kützing, 1845, *Tetrastrum* Chodat, 1895. Часто встречаемыми цианобактериями были виды: *Aphanocapsa delicatissima* W. & G.S. West, *Merismopedia tenuissima*

Lemmermann, *Microcystis aeruginosa* (Kützing) Kützing, *Microcystis flosaquae* (Wittrock) Kirchner, *Planktothrix* sp., *Oscillatoria* sp., *Pseudanabaena limnetica* (Lemmermann) Komárek.

Значения численности и биомассы фитоперифитона на пластинах, которые находились в водоеме **двенадцать месяцев**, сходны с показателями, отмеченными после 9 месяцев экспозиции: 67–269 кл/см² (средняя 124 ± 66 кл/см²) и 0,3–1,1 мкг/см² (средняя 0,5 ± 0,3 мкг/см²). Отличие заключалось в резком уменьшении количества отмеченных видов водорослей – до 60, среди которых сохраняли количественное преимущество диатомеи: *Amphora* sp., *Bacillaria paxillifera* (Müller) Marsson, *Cymbella* sp., *Gyrosigma* sp., *A. granulata*, *Haslea* sp., *Staurisira construens* Ehrenberg, *C. solea*, *Pinnularia* sp., *U. ulna*, виды родов *Navicula*, *Nitzschia* и *Surirella*. Изредка встречались виды зеленых водорослей и цианобактерий, и только на пластинах, размещенных в пос. Кагальник, в незначительном количестве еще были отмечены представители Euglenophyta.

В течение исследуемого периода наблюдали один выраженный максимум численности и биомассы фитоперифитона (рис. 5.2, 5.3). Эта вспышка прилась на середину марта – период весеннего массового развития диатомовых водорослей в толще воды, вызываемого весенним поступлением обогащенных биогенными элементами талых вод. В последующие месяцы отмечали снижение количественных показателей фитоперифитона, а в начале июня наблюдали увеличение числа видов и частоты встречаемости планктонных представителей зеленых водорослей и цианобактерий. Бурное весеннее развитие водорослей приводит к быстрому сокращению концентрации фосфатов, обычно приходящееся на конец весны – начало лета. В это время в фитопланктоне и перифитоне доминируют устойчивые к дефициту фосфора диатомовые водоросли, но сокращение концентрации биогенов вызывает общую депрессию биомассы водорослевых сообществ. В то же время уменьшение соотношения азот/фосфор дает возможность развиваться более требовательным к фосфору зеленым водорослям и цианобактериям – что наблюдали в настоящем исследовании. Однако при их дальнейшем массовом развитии в фитопланктоне, которое обычно происходит во второй половине лета, уменьшается и прозрачность воды, вследствие чего водоросли, находящиеся в перифитоне, испытывают недостаток света, который вызывает депрессию фитоперифитона. Во время исследования, помимо описанных процессов в водоеме, на образцах, экспонировавшихся в водоеме более 6 месяцев, отмечали активное развитие

фитофагов, также оказывающих влияние на обилие и продуктивность фитоперитона.

Таким образом, несмотря на то, что начало эксперимента пришлось на холодное время года (зимний и ранневесенний периоды), на пластинах с нарастающим сроком экспозиции уже по истечении первого месяца эксперимента было отмечено начало колонизации субстрата микрофитоперифитоном и его бурное развитие через три месяца. В дальнейшем были отмечены таксономические перестройки в составе фитоперифитонного сообщества и резкий спад его количественных показателей, которые связаны не только с сезонной сукцессией, но и с результатом воздействия пресса фитофагов.

Всего в составе фитоперифитона обнаружено 146 таксонов водорослей и цианобактерий рангом ниже рода. На протяжении всего наблюдения формирование сообществ и количественная динамика микроводорослей на экспериментальных пластинах были связаны с доминированием диатомовой флоры. Основная часть представителей является перифитонными, бентосными формами, однако еще были отмечены планктонно-бентосные виды (встречающиеся в планктоне и бентосе водоема) и планктонные (осевшие из толщи воды на субстрат или запутавшиеся в обрастаниях).

5.2. Сообщества микрозоопланктона на экспериментальных пластинах

Одним из значимых компонентов перифитонного сообщества являются инфузории. Причем сообщество перифитона включает в себя как инфузорий-эпибионтов или эуперифитон, так и свободноплавающие и ползающие формы, играющие важную роль в функционировании этих сообществ.

Всего за время исследования было обнаружено 67 форм инфузорий, относящихся к 47 родам и 7 классам (рис. 5.4). По количеству обнаруженных видов классы распределены неравномерно. Наиболее разнообразно был представлен класс *Oligohymenoforea* de Puytorac et al., 1974. Комплекс массовых видов на пластинах из различных материалов и с разным сроком экспозиции был сходен. Он был представлен такими видами, как *Carchesium polypinum* Linnaeus, 1758, *Zoothamnium* sp., *Aspidisca costata* (Dujardin, 1841) Stein, 1859, *Stentor roeseli* Ehrenberg, 1835 и несколькими видами вортицелл, относящихся к группе *Convalaria*. Общая струк-

тура цилиосообщества и его количественные характеристики по сезонам зависели от характера субстрата и были связаны с его архитектурой.

Обнаруженные виды инфузорий представлены как «истинно перифитонными» формами (45 %), прикрепляющимися к субстрату, так и планкто-бентосными (55 %).

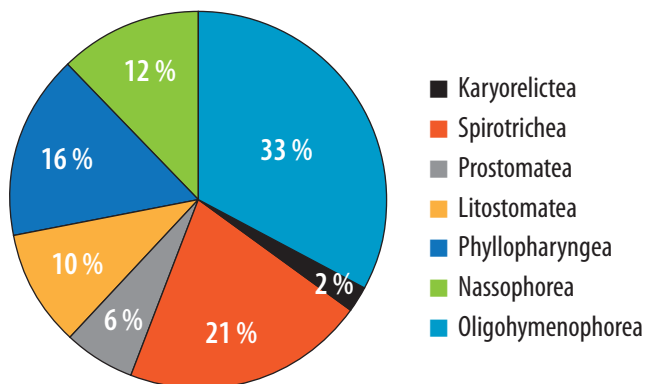


Рис. 5.4. Структура сообщества перифитонных инфузорий рек Дон и Кагальник по количеству видов (2018–2019 гг.)

По трофической специализации, по количеству обнаруженных в сообществе видов доминировала группа микрофагов. Доля альгофагов находилась почти на одном уровне. Доля хищников на пластинах **3-месячного срока экспозиции** была в 2 раза ниже.

Несмотря на явное доминирование в цилиосообществе инфузорий-микрофагов, по размерной структуре лидирующее положение принадлежит видам, относящимся к крупной и средней размерной группе. Это происходит благодаря наличию большого количества колониальных форм. Также с увеличением возраста сообщества наблюдается тенденция к увеличению в составе сообщества количества крупных видов.

На пластинах, находившихся в воде в течение **одного месяца**, было обнаружено 27 видов инфузорий. Наибольшее количество видов (16) наблюдалось на пластинах АО-120, наименьшее (6) на пластинах Д16. Наибольшая частота встречаемости была у мелких гипотрихид *Aspidisca costata* (Dujardin, 1841) Stein, 1859 и длинностебельковых колоний перитрих, таких как *Carchesium polypinum* Linnaeus, 1758 и *Zoothamnium* sp. Численность инфузорий в обрастаниях на пластинах после одного месяца экспозиции колебалась от 2,1 до 22,9 кл/см², в среднем составив $8,2 \pm 2,7$ кл/см² (рис. 5.5).

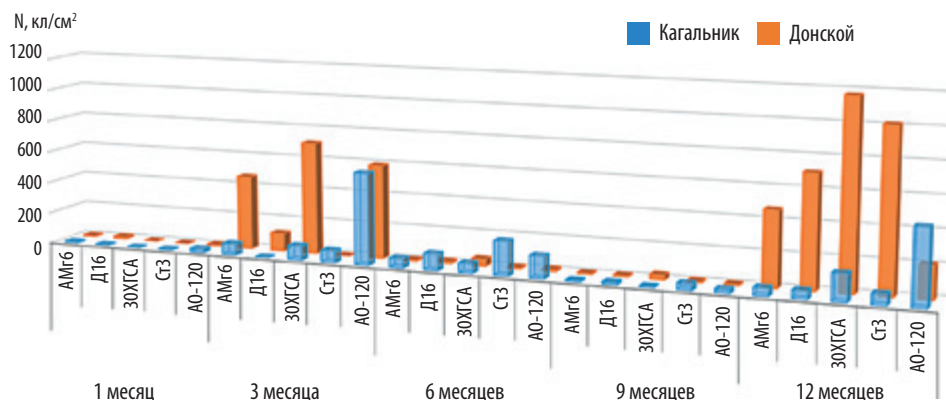


Рис. 5.5. Динамика численности инфузорий перифитона на экспериментальных пластинах нарастающего срока экспозиции, кл/см²

Биомасса колебалась от 0,03 до 0,6 мкг/см², в среднем составив $0,2 \pm 0,07$ мкг/см² (рис. 5.6).

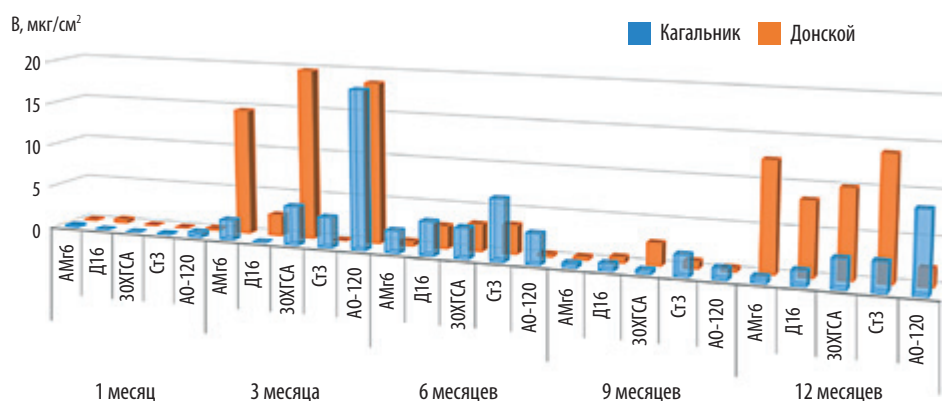


Рис. 5.6. Динамика биомассы инфузорий перифитона на экспериментальных пластинах нарастающего срока экспозиции, мкг/см²

На образцах после **3-месячной экспозиции** количество обнаруженных видов возросло до 38. Массовое развитие крупных колониальных перитрих (*Carchesium polyrinum* Linnaeus, 1758, *Zoothamnium* sp.) изменяет пространственную структуру перифитонного сообщества, увеличивая ярусность и создавая дополнительные поверхности для прикрепления других видов организмов. На колониях было обнаружено значительное количество эпибионтных видов инфузорий – *Cothurnia annulata* Stokes, 1885 *Vorticella* spp., *Pyxicola* spp.

Так же как при 1-месячной экспозиции, наибольшее количество видов (18) наблюдалось на пластинах АО-120, наименьшее (5) – на Д16.

Численность и биомасса инфузорий на образцах после трехмесячной экспозиции была на 2–3 порядка выше, чем при 1-месячной экспозиции. Рост количественных характеристик был обусловлен резким увеличением плотности обрастания пластин длинностебельковыми колониями перитрих. Численность инфузорий в этот период колебалась от 70,7 до 706,7 кл/см², в среднем составив $335,8 \pm 98,0$ кл/см². Биомасса инфузорий колебалась от 0,3 до 19,7 мкг/см², в среднем – $10,5 \pm 2,8$ мкг/см².

Количество видов, обнаруженных на образцах, по истечении **6 месяцев** эксперимента было таким же, как при 3-месячной, – 38 видов. Однако состав сообщества претерпел некоторые изменения. Колониальные перитрихи сохранили свое доминирующее положение, но уровень их количественных характеристик сильно снизился. На этом этапе увеличилась доля крупных сидячих видов – раковинных или временно прикрепляющихся. Это такие виды, как *Stentor roeseli* Ehrenberg, 1835, *Stentor coeruleus* Ehrenberg, 1830, *Folliculina* spp., *Acineta* spp.

На пластинах 6-месячной экспозиции численность инфузорий была заметно ниже: от 6,7 до 216,7 кл/см², в среднем составив $67,5 \pm 21,7$ кл/см². Особенно сильно снижение уровня численности было выражено на образцах на траверсе хутора Донской.

Биомасса инфузорий при 6-месячной экспозиции также снизилась, но менее заметно: от 0,3 до 7,1 мкг/см², в среднем составив $3,2 \pm 0,7$ мкг/см². Неравномерное снижение показателей численности и биомассы произошло из-за увеличения доли крупных и средних видов инфузорий при 6-месячной экспозиции.

Состояние сообщества перифитонных инфузорий на пластинках 9-месячной экспозиции характеризовалось общим снижением качественных и количественных характеристик. Количество встреченных видов было ниже, чем в предыдущих случаях, – 24 вида. Максимальное количество видов так же снизилось – 11 видов на пластинах типа Ст3. Комплекс массовых видов остался таким же, как на пластинах 6-месячной экспозиции.

Численность инфузорий в этот период колебалась от 5,8 до 40,6 кл/см², в среднем составив $15,1 \pm 3,8$ кл/см².

Биомасса инфузорий колебалась от 0,3 до 2,5 мкг/см², в среднем – $1,0 \pm 0,3$ мкг/см².

На пластинах, находившихся в воде в течение **12 месяцев**, наблюдалось резкое увеличение качественных и количественных характеристик

сообщества инфузорий. Здесь был обнаружен 41 вид цилиат. Число видов, встреченных в обрастаниях одной пластины, повысилось до 18 (АО-120). Уменьшилась частота встречаемости видов рода *Stentor*. Значительно увеличилась численность и частота встречаемости одиночной длинностебельковой перитрихи *Vorticella campanula* Ehrenberg, 1831 из группы *Convallaria*.

На пластинах 12-месячной экспозиции наблюдался самый высокий уровень численности перифитонных инфузорий. Численность инфузорий в этот период колебалась от 50,5 до 1169,4 кл/см², в среднем составив $438,4 \pm 129,2$ кл/см².

Биомасса инфузорий была ниже максимальной, наблюдавшейся на пластинах после 3 месяцев экспозиции, и колебалась от 0,7 до 13,9 мкг/см², в среднем – $6,5 \pm 1,5$ мкг/см².

Таким образом, за все время эксперимента мы наблюдали два пика развития количественных характеристик сообщества перифитонных инфузорий: с максимумом уровня биомассы на пластинках после трех месяцев экспозиции и с максимумом уровня численности на пластинах после 12 месяцев эксперимента (рис. 5.5, 5.6). Наименьший уровень обрастания пластин цилиоперифитоном был отмечен на пластинах Д16, а наибольший – на АО-120 и 30ХГСА.

Уровень развития численности и биомассы на образцах в районе БНЭБ «Кагальник» в течение всего времени экспозиции был значительно ниже, чем на ГМП «Донской». В районе БНЭБ «Кагальник» в течение всего времени проведения эксперимента отмечен более высокий уровень видового разнообразия инфузорий обрастаний.

5.3. Формирование сообществ макрообрастаний на экспериментальных пластинах

Согласно опубликованным данным, в солоноватых (устья рек) водах в состав обрастания входят: двустворчатые моллюски *Dreissena* spp., усоногие раки *Balanus improvisus* и *B. eburneus*, мшанки *Conopeum* spp., *Membranipora* spp. Биомасса обрастания здесь большая, т.к. реки приносят в приустьевые участки большое количество питательных веществ [Герасимов, 2014].

По истечении одного месяца экспонирования на экспериментальных пластинах у БНЭБ «Кагальник» было отмечено 2 таксона макрозообентоса (*Pontogammarus* (*Obesogammarus*) *crassus* (G.O. Sars, 1894), *Chironomus* cf. *plumosus*), на ГМП «Донской» – 1 таксон (*C. plumosus*) (рис. 5.7).

Через 3 месяца экспозиции донные беспозвоночные на БНЭБ «Кагальник» наблюдались только на пластине 30ХГСА, среди них обнаружены единичные особи двустворчатого моллюска фильтратора-сестонофага *Dreissena polymorpha* (Pallas, 1771), формирующего богатые по биомассе друзовые сообщества в дельте Дона и кутовой части Таганрогского залива, а также нематоды отряда Enoplida и гаммариды *P. crassus* (рис. 5.7). Фотографии образцов сразу после съема приведены на рисунке 5.8.

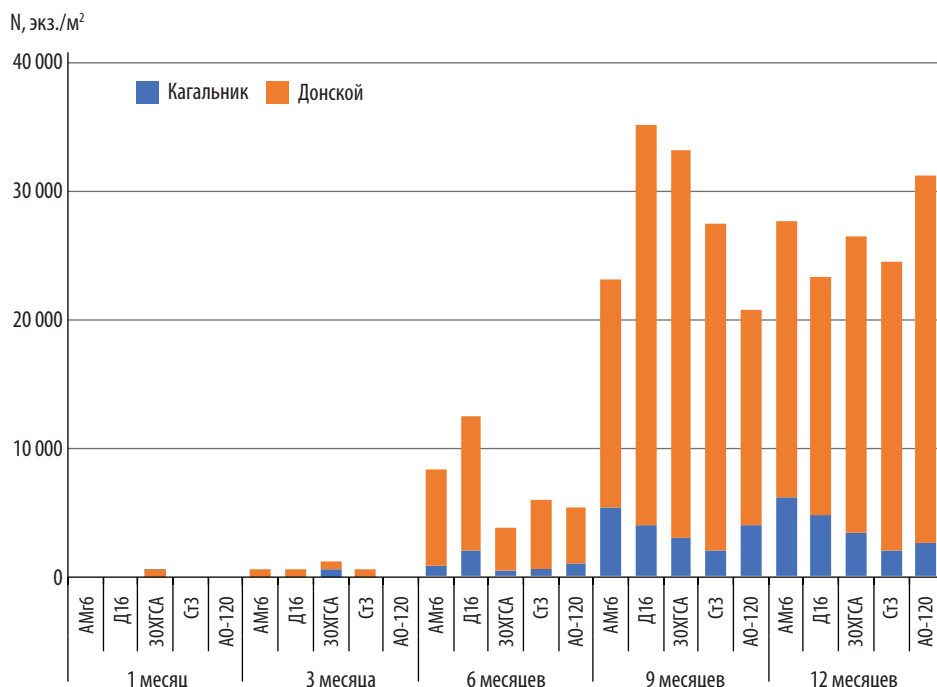


Рис. 5.7. Динамика численности организмов-макрообрастателей на экспериментальных пластинах нарастающего срока экспозиции

На станции ГМП «Донской» организмы макрозообентоса зарегистрированы на всех пластинах, за исключением изготовленных из органического стекла. Число таксонов на пластинах колебалось от 1 до 4, всего зарегистрировано 5 таксонов (*Enoplida*, *Tubifex tubifex* (O.F. Müller, 1774), *P. crassus*, *C. cf. plumosus*, *Hydrobia acuta* (Draparnaud, 1805)). На пластине D16 также отмечены единичные особи *D. polymorpha*. Фотографии образцов сразу после съема приведены на рисунке 5.9.

Обрастания начинали формироваться в верхней части пластины в зоне контакта с деревянными стендами.

Через **6 месяцев экспозиции** отмечен резкий скачок численности макробеспозвоночных (рис. 5.7). На пластинах, экспонируемых у гидрометеопоста «Донской», этот показатель был выше в 2–5 раз, чем на аналогичных пластинах, экспонируемых у БНЭБ «Кагальник». На всех образцах отмечены обрастания, сформированные *Fredericella sultana* (Blumenbach 1779) (Bryozoa Phylactolaemata), на ряде пластин отмечены гидроиды *Cordylophora caspia* (Pallas, 1771) (Hydrozoa: Cnidaria). В большом количестве присутствовала молодь моллюсков *D. polymorpha* и ракообразные *Corophium volutator* (Pallas, 1766), последние формируют специфические корофиидные илы в дельте Дона. Проективное покрытие обрастателей составляло от 15 до 80 % (максимум отмечен на Д16 на ГМП «Донской»).

После 6 месяцев на БНЭБ «Кагальник» выявлено 8 таксонов макробеспозвоночных: *F. sultana*, *C. caspia*, *T. tubifex*, *Viviparus viviparus* (Linnaeus, 1758), *D. polymorpha*, *P. crassus*, *C. volutator*, *C. cf. plumosus*. На ГМП «Донской» выявлено 11 таксонов: *F. sultana*, *C. caspia*, *T. tubifex*, *Piscicola geometra* (Linnaeus, 1761), *Caspiobdella caspica* (Selensky, 1915), *H. acuta*, *V. viviparus*, *D. polymorpha*, *P. crassus*, *C. volutator*, *C. cf. plumosus*.

Фотографии поверхности экспериментальных пластин после экспонирования при полном погружении в течение 6 месяцев приведены на рисунках 5.10, 5.11.

По истечении **9 месяцев** отмечен резкий рост численности и биомассы макрообрастателей (рис. 5.7). Наибольший вклад в биомассу вносили моллюски *D. polymorpha* на обеих станциях. На станции ГМП «Донской» на пластинах, изготовленных из стали обеих марок, среди обрастаний *D. polymorpha* отмечены единичные особи моллюска-вселенца *Dreissena bugensis* (Andrusov, 1897).

Максимальные показатели численности зарегистрированы на пластине из алюминиевого сплава Д16 на ст. 2. Проективное покрытие обрастателей составляло от 65 до 90 %. Сократились площади, занятые мшанками и гидроидами (рис. 5.12, 5.13).

После **12 месяцев экспозиции** наибольшая численность зафиксирована на образце из оргстекла на ст. 2. Как и на пластинах, находившихся в воде в течение 9 месяцев, наибольший вклад в биомассу вносили моллюски *D. polymorpha* на обеих станциях (рис. 5.14, 5.15). Мшанки и гидроидные полипы отсутствуют. На ст. 1 на погруженном стенде отмечен хищный краб-вселенец *Rhithropanopeus harrisi* (Gould, 1841), использующий экспериментальные пластины для поиска пищи.

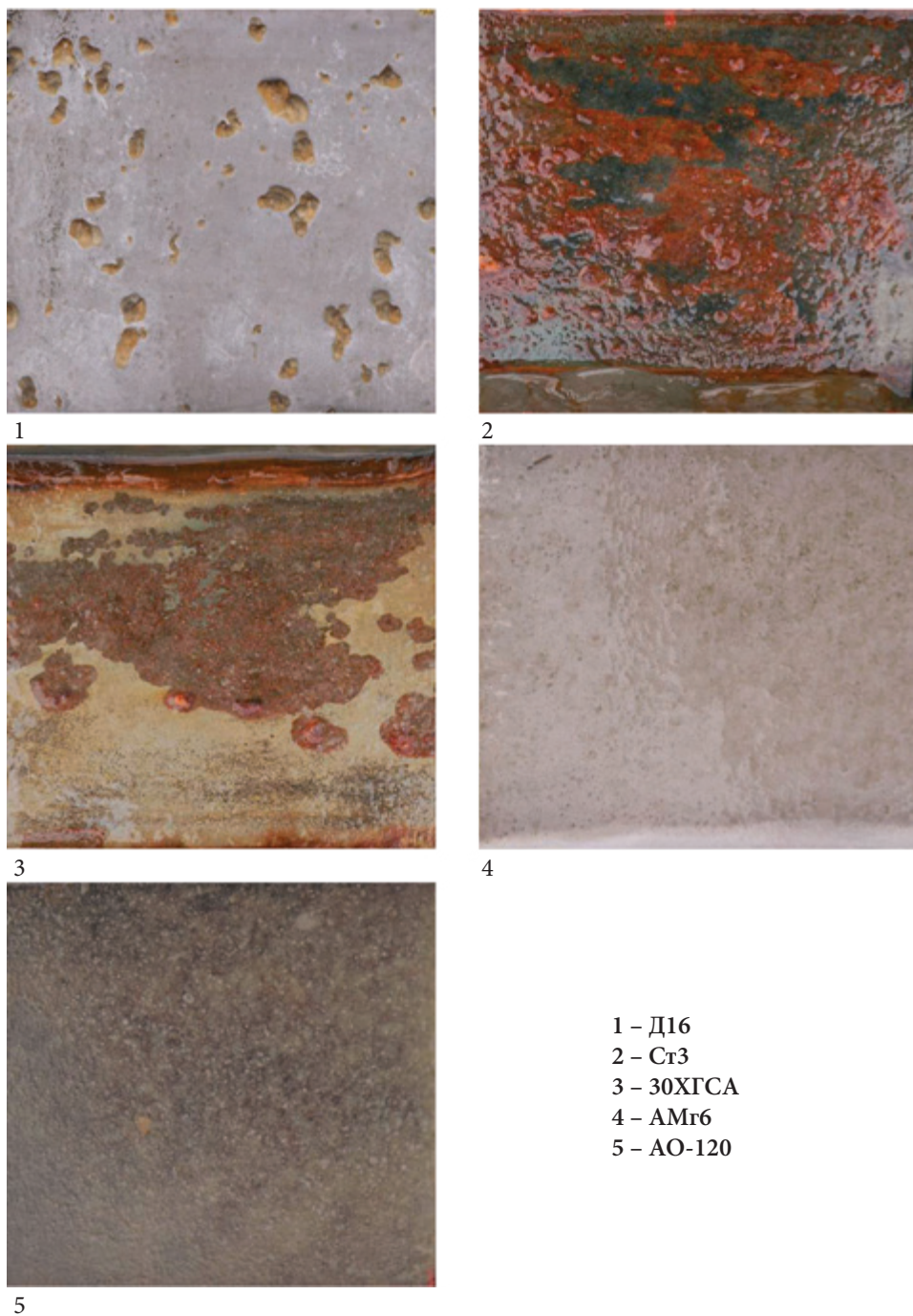


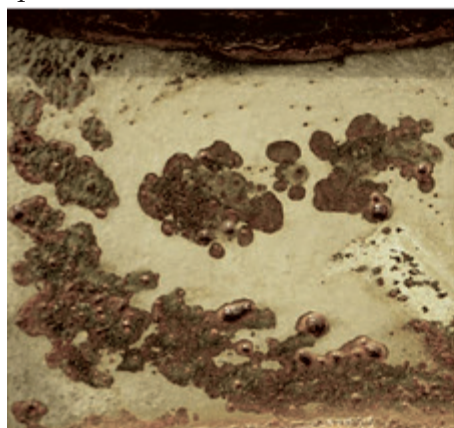
Рис. 5.8. Экспериментальные пластины, экспонировавшиеся на БНЭБ «Кагальник» в течение 3 месяцев



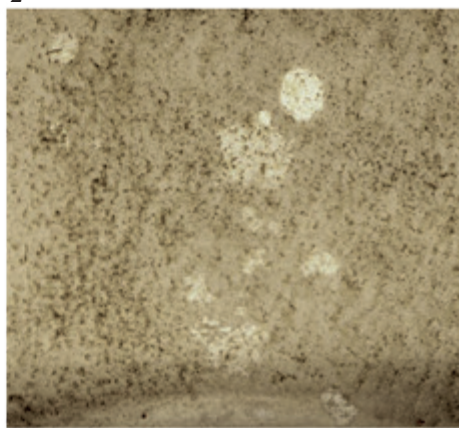
1



2



3



4



5

1 – Д16
2 – Ст3
3 – 30ХГСА
4 – АМг6
5 – АО-120

Рис. 5.9. Экспериментальные пластины, экспонировавшиеся на ГМП «Донской» в течение 3 месяцев



1



2



3



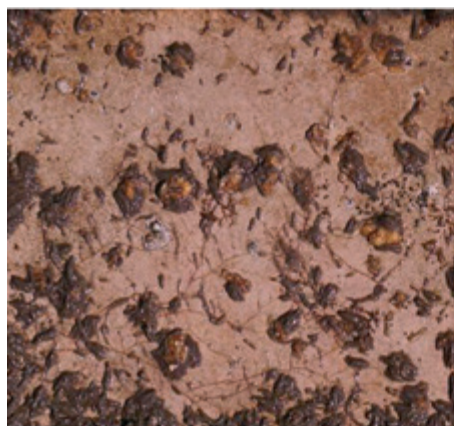
4



5

- 1 – Д16
- 2 – Ст3
- 3 – 30ХГСА
- 4 – АМг6
- 5 – АО-120

Рис. 5.10. Экспериментальные пластины, экспонировавшиеся на БНЭБ «Кагальник» в течение 6 месяцев



1



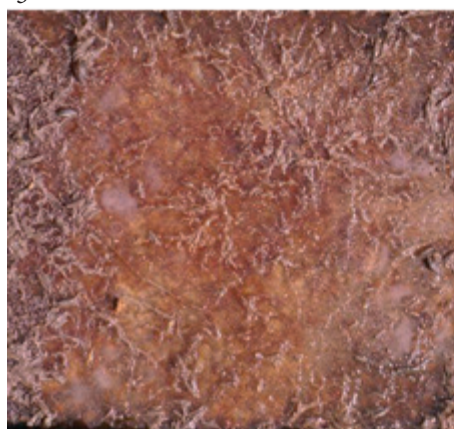
2



3



4



5

1 – Д16
2 – Ст3
3 – 30ХГСА
4 – АМг6
5 – АО-120

Рис. 5.11. Экспериментальные пластины, экспонировавшиеся на ГМП «Донской» в течение 6 месяцев



1



2



3



4



5

- 1 – Д16
- 2 – Ст3
- 3 – 30ХГСА
- 4 – АМг6
- 5 – АО-120

Рис. 5.12. Экспериментальные пластины, экспонировавшиеся на БНЭБ «Кагальник» в течение 9 месяцев



1



2



3



4



5

- 1 – Д16
2 – Ст3
3 – 30ХГСА
4 – АМг6
5 – АО-120

Рис. 5.13. Экспериментальные пластины, экспонировавшиеся на ГМП «Донской» в течение 9 месяцев



1



2



3



4



5

- 1 – Д16
- 2 – Ст3
- 3 – 30ХГСА
- 4 – АМг6
- 5 – АО-120

Рис. 5.14. Экспериментальные пластины, экспонировавшиеся на БНЭБ «Кагальник» в течение 12 месяцев

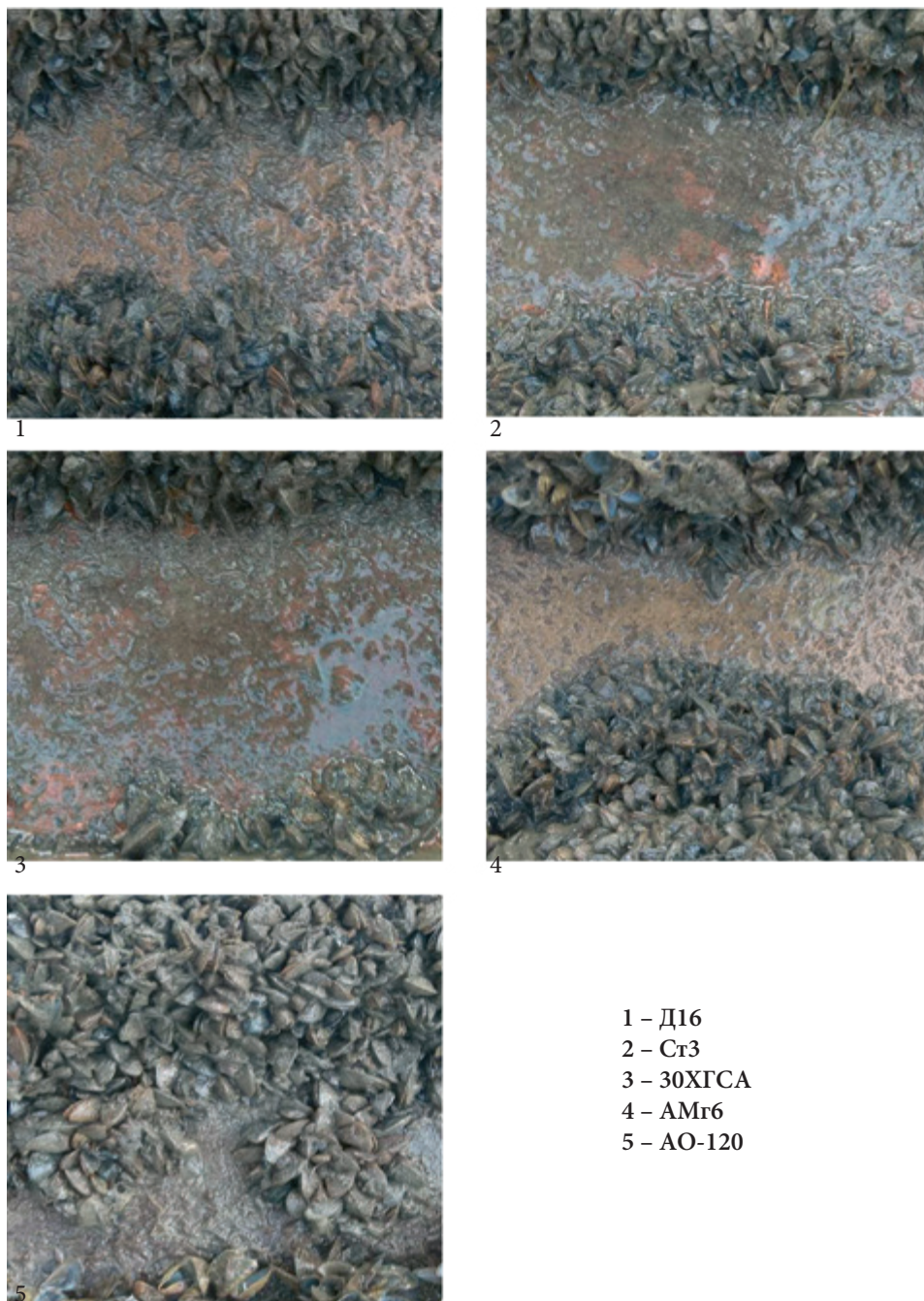


Рис. 5.15. Экспериментальные пластины, экспонировавшиеся на ГМП «Донской» в течение 12 месяцев (на фото видны открытые створки погибших особей *D. polymorpha*)

Моллюски рода дрейссена, доминирующие на экспериментальных пластинах 9-месячного срока экспозиции, рассматриваются как наиболее опасные организмы-обрастатели в пресных водоемах. На рисунке 5.16 показано заселение экспериментальной установки дрейссенидами. По данным наших наблюдений, плотность поселения этих моллюсков на деревянных поверхностях в несколько раз выше, чем на металлах.



Рис. 5.16. Обрастание деревянной поверхности стенда, сформировавшееся за 9 месяцев экспозиции у ГМП «Донской»

Причины неоднородности поселения *D. polymorpha* (чередование многослойных друз или наличие пятен необросшей поверхности) на субстрате сходны с описанными А.Ю. Звягинцевым для мидий [2005] и обусловлены следующими процессами:

- миграцией молоди моллюсков;
- сбросом друз под действием собственной массы;
- отслаиванием обрастания в результате коррозии.

Многолетнее сообщество дрейссенид сохраняет относительно стабильную структуру благодаря мелкомасштабным циклическим сукцессиям, а также пополнению за счет меропланктона.

Согласно опубликованным данным [Столбунова, 2013], дрейссениды обитают на глубине до 10–20 м и местами образуют огромные скопления, обрастая камни, сваи и различные гидротехнические сооружения и т.д.

Плотность моллюсков в скоплениях достигает подчас 10 000 экземпляров на 1 м² при биомассе 7 кг на ту же площадь [Каблов и др., 2010]. Процесс обрастания поверхности дрейссеной можно разделить на 3 этапа: оседание раковин или личинок моллюска на поверхности, закрепление и обрастание. Закрепление моллюсков дрейссены на субстрате с помощью биссусных нитей делает неэффективным применение традиционных покрытий, содержащих токсичные биоциды, так как достаточная для подавления жизненной активности и гибели дрейссены концентрация биоцида содержится только в тонком пристеночном слое воды [Каблов и др., 2010].

По истечении 12 месяцев эксперимента можно сделать вывод, что сообщество обрастания в районе смешения речных и морских вод представляет собой многовидовой биоценоз, схема развития которого схожа с классической [Scheer, 1945]. В начале наблюдений отмечали микрообрастания, состоящие из микробно-диатомовой пленки и цилиосообщества, затем появлялись пионерные макрообрастатели, которые позже замещались постоянными макроорганизмами-обрастателями. На протяжении двенадцати месяцев исследований формирование сообществ и количественная динамика микроводорослей на экспериментальных пластинах были связаны с доминированием диатомовой флоры. Основная часть представителей является перифитонными, бентосными формами, однако еще были отмечены планктонно-бентосные виды и планктонные. По истечении шести месяцев экспозиции были отмечены таксономические перестройки в составе фитоперифитонного сообщества и резкий спад его количественных показателей, которые связаны не только с сезонной сукцессией, но и с ростом численности макробеспозвоночных-фитофагов, заселяющих экспериментальные пластины.

В ходе исследования фауны перифитонных инфузорий, сезонной динамики и особенностей прохождения первичной сукцессии цилиосообщества на пластинках обрастаний в дельте Дона были выявлены некоторые особенности структуры и развития сообществ прикрепленных инфузорий в зависимости от архитектуры субстрата. Для данной акватории исследования перифитонных инфузорий проведены впервые.

В ходе эксперимента было отмечено, что сезонная динамика показателей макрообрастателей на изолированных от донных осадков антропогенных субстратах подчиняется общей закономерности: скорость развития сообществ обрастания максимальна поздней весной, летом и осенью и резко снижается в позднеосенний и зимний периоды с «поправкой»

на природные явления (колебания температуры и солености, сгоны и т.д.). Для пластин нарастающего срока экспозиции отмечен резкий скачок численности и биомассы на образцах, срок экспозиции которых составил 9 месяцев. Отмечена смена доминирующих видов: после 6 месяцев экспозиции на экспериментальных пластинах по численности преобладали мшанки и гидроиды, после 9 месяцев – *Dreissena polymorpha* (Pallas, 1771), вид, формирующий друзовые сообщества в устьевой области Дона. Особенностью формирования сообществ обрастания на экспериментальных пластинах является отсутствие макрофитов во все сроки учета.

Проблема нефтяного загрязнения прибрежных акваторий была, есть и, по-видимому, в ближайшее время никуда не исчезнет, несмотря на усилия специалистов самых разных направлений. Особенно остро эта проблема стоит в арктических морях в связи с увеличением добычи нефти и газоконденсата на шельфе, возрастанием грузоперевозок и строительством на побережье предприятий по переработке, перегрузке углеводородного сырья. Из-за низких температур, почти трех месяцев полярной ночи процесс биодеструкции нефтепродуктов (НП), попадающих в морскую воду, замедлен.

Исследованиями последних лет было продемонстрировано возможное участие в биоремедиации от НП водорослей-макрофитов, обитателей литорали и сублиторали.

В результате исследований в этом направлении в том числе и авторами данной работы в рамках программы «Опасные явления» (грант РФФИ № 18-05-80058) была сформулирована доказательная база, подтверждающая способность морских водорослей-макрофитов, различающихся по строению и систематической принадлежности, к сорбции и деструкции нефтепродуктов, что обуславливает их значимую роль в очистке прибрежных акваторий от нефтяного загрязнения, создает основу для развития санитарной аквакультуры.

Среди широкого спектра нефтепродуктов дизельное топливо (ДТ) является наиболее используемым морским и наземным транспортом, кроме того, на побережье расположены предприятия (действующие либо строящиеся) по переработке нефти. Именно ДТ наиболее часто оказывается основным загрязнителем морской среды, особенно прибрежных акваторий. Морские водоросли-макрофиты, населяющие литоральную и сублиторальную зоны побережья моря, оказываются наиболее подверженными влиянию данного токсиканта.

В данной главе представлены результаты исследований последних лет, касающихся влияния ДТ на водоросли-макрофиты, механизмов адаптации, обеспечивающих выживание водорослей в условиях загрязнения НП, и роли прибрежных фитоценозов в очистке морской воды от нефтепродуктов. Получение представленных результатов стало возможным только с использованием широкого спектра методов: от рутинных гидробиологических до электронно-микроскопических, морской микробиологии, биохимии.

6.1. Поглощение и преобразование дизельного топлива водорослью *Palmaria palmata* (Linnaeus) F. Weber & D. Mohr, 1805 (Rhodophyta) и ее возможная роль в биоремедиации морской воды

В арктической зоне существует проблема хронического загрязнения прибрежных акваторий нефтепродуктами. В литературе рассматривается решение проблемы ремедиации морской среды от НП с помощью диспергентов, сорбентов или размещения в зонах постоянного загрязнения искусственных рифов. К сожалению, диспергенты часто токсичны и наносят биоте больший вред, чем НП. Сорбенты в арктических морях сложны в использовании из-за частых штормов, а постоянные искусственные рифы осложняют мореплавание в прибрежной зоне. В последние годы высказывались предложения о возможности применения для очистки от НП морских водорослей-макрофитов [Wrabel, Peskol, 2000; Семенов и др., 2014; Путовкин и др., 2016; Воскобойников и др., 2017]. Наиболее часто используемым морским транспортом видом НП является дизельное топливо. У двух видов макроводорослей: *Fucus vesiculosus* (Phaeophyta) и *Ulvaria obscura* (Chlorophyta) – выявлена сорбционная способность в отношении ДТ [Воскобойников и др., 2017; 2018; Pilatti et al., 2016]. В экспериментах по очистке морской воды от НП с помощью данных видов было показано, что уменьшение содержания ДТ в воде шло параллельно с его накоплением в растениях. При этом деструкция НП у ульварии и фукуса происходила всем талломом, начинаясь на поверхности водоросли, с помощью эпифитных углеводородокисляющих бактерий (УОБ), что обеспечивало поглощение и нейтрализацию НП клетками растения [Воскобойников и др., 2017; 2018]. Известно, что УОБ, образующие с водорослями-макрофитами взаимовыгодную симбиотическую ассоциацию, могут окислять почти все нефтепродукты [Atlas et al., 1978; Семенова и др., 2009а, 6].

Эти сведения стали доказательной базой, подтверждающей высказанное ранее предположение о том, что водоросли могут выполнять не только

роль субстрата для УОБ, но и осуществлять с помощью УОБ деструкцию НП, поглощать компоненты НП и включать в метаболизм [Семенов и др., 2014; Воскобойников и др., 2017, 2018].

Цель данного исследования – определить, обладают ли такой способностью и другие водоросли, отличающиеся от изученных ранее *F. vesiculosus* (Phaeophyceae) и *U. obscura* (Chlorophyta) по систематической принадлежности и морфологии. В представленной работе проанализированы морфофункциональные изменения под влиянием НП у красной водоросли *Palmaria palmata* (Rhodophyta), широко распространенной на литорали арктических морей, а также возможность ее участия в очистке морской среды от НП.

В ходе исследования морскую воду (соленость 33 ‰) предварительно фильтровали через ватно-марлевый фильтр и добавляли в нее летнее дизельное топливо в количестве 1 мг/л, что составляет 20 ПДК для воды по валовому содержанию НП.

Вегетативные талломы *Palmaria palmata* (пальмария пальчатая), примерно равные по размерно-массовым показателям, отбирали на побережье губы Зеленецкой Баренцева моря (69°07'09" с.ш., 36°05'35" в.д.), очищали от обрастателей и помещали в стеклянные емкости с морской водой объемом 1,3 литра.

Опыт проводили в термостатируемом боксе при температуре 7–8 °С, освещении 16–18 Вт/м² и постоянной аэрации воды воздухом. Общая продолжительность эксперимента составила 21 сутки. Каждые 7 суток образцы воды и водорослей отбирали и анализировали: у водорослей исследовали изменения морфологии, фотосинтеза, в воде и в водорослях – содержание 17 индивидуальных алканов ДТ (включая изопреноиды пристан и фитан) и валовое содержание НП.

Контроль за изменением состояния и морфологии таллома пальмарии осуществляли в течение опыта визуальными и светооптическими методами.

Интенсивность видимого фотосинтеза (ИФ) водорослей определяли по изменению содержания кислорода в воде до и после инкубации талломов с помощью оксиметра HANNA HI 9141 (Германия) и йодометрическим методом Винклера. Интенсивность фотосинтеза рассчитывали в мкг О₂ на 1 г сырой массы таллома в час [Вознесенский и др., 1965]. Активность фермента каталазы (АК) анализировали с помощью спектрофотометрического метода [Королук, 1988]. Измерения проводили на спектрофотометре JENWAY 6305 UV/VIS.

Фотосинтетические пигменты экстрагировали по общепринятым методикам [Ли, 1978; Маслова и др., 1986]. Спектры поглощения экстрактов регистрировали спектрофотометрически, концентрации пигментов рассчитывали по формулам [Seely et al., 1972; Rosenberg, 1981].

Концентрации алканов и валовое содержание НП в воде и водорослях определяли методом газовой хроматографии/масс-спектрометрии (ГХ/МС).

Процесс пробоподготовки и инструментального анализа осуществляли на основе методики EPA 8270 (Semivolatile Organic Compounds by GC/MS). Для подготовки проб воды применяли жидкостно-жидкостную экстракцию при нейтральном значении показателя кислотности среды. Образцы водорослей подвергали экстракции в ультразвуковой установке. Раствор внутреннего стандарта (2-фторнафталин) вводили в пробы воды и водорослей непосредственно перед экстракцией. Анализ экстрактов проводили с использованием хроматомасс-спектрометра единичного разрешения DSQII фирмы "Thermo Finnigan" (Германия). Расчет массовой доли содержания компонентов дизельного топлива производили с использованием метода внутреннего стандарта. Результаты представлены в мкг/л для воды и в мкг/г сухого веса для водорослей. При расчете значений концентраций учитывали коэффициент чувствительности масс-спектрометрического детектора в парах 2-фторнафталин/дейтерированный пентадекан (D_{32}) и 2-фторнафталин/дейтерированный эйкозан (D_{42}).

В течение эксперимента морфологических различий между контрольными и опытными растениями не наблюдалось. Интенсивность фотосинтеза у контрольных растений сохранялась примерно на одном уровне в течение всего эксперимента. У опытных растений после 7 суток воздействия ДТ было зарегистрировано значительное повышение ИФ, к 21 суткам эксперимента ИФ снижалась (рис. 6.1).

В литературе имеются данные о возможном стимулирующем действии на фотосинтез низких концентраций ДТ (20 ПДК), аналогичного по составу используемому нами в эксперименте [Степаньян, 2008]. Возможно, что вклад в увеличение содержания кислорода в воде, отмеченное на 7-е сутки опыта, обеспечивают и цианобактерии. Увеличение выделяемого ими кислорода в ответ на повышение в воде содержания НП отмечалось многими авторами [Гусев и др., 1981]. На последующих сроках опыта наблюдается снижение фотосинтеза, происходящее на фоне снижения НП в воде. Вместе с тем показатель ИФ у опытных растений даже после длительного воздействия ДТ близок к исходному.

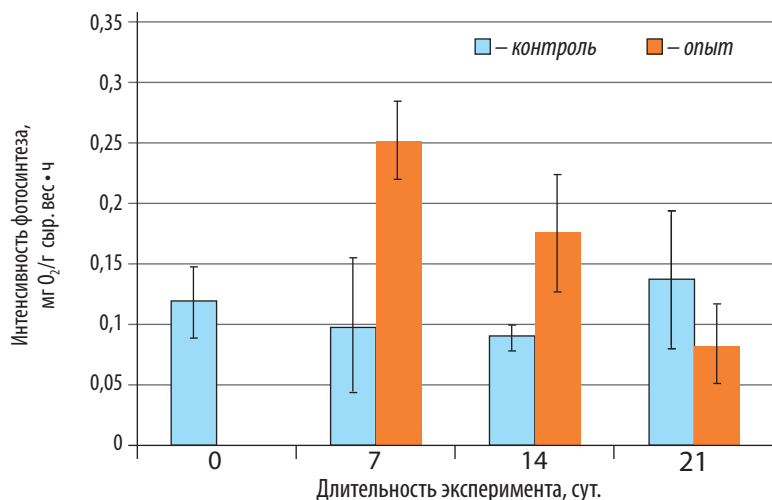


Рис. 6.1. Изменение интенсивности фотосинтеза у *P. palmata* в течение эксперимента

В течение эксперимента активность каталазы у контрольных образцов водорослей изменялась незначительно: постепенное повышение активности каталазы, которое отмечалось до 14-х суток эксперимента, в дальнейшем, на 21-е сутки, снижалось до начального уровня. У опытных образцов активность каталазы не изменялась и оставалась выше начального уровня (рис. 6.2).

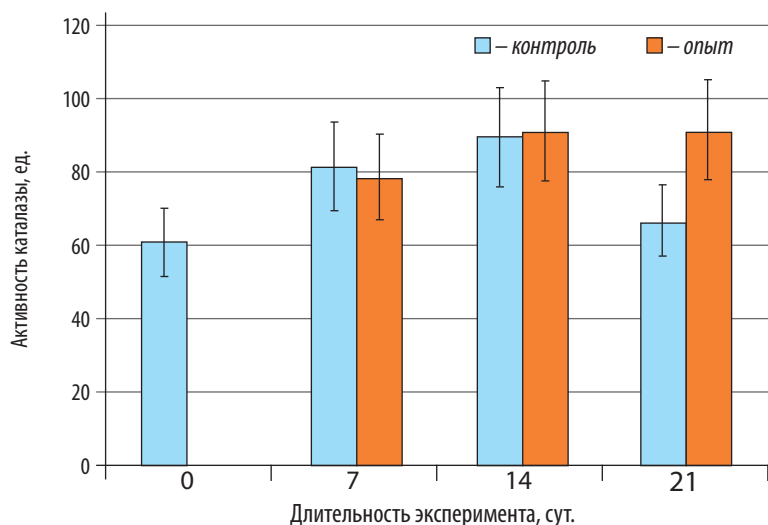


Рис. 6.2. Изменение активности каталазы в клетках *P. palmata* в течение эксперимента

В работах, посвященных определению активности каталазы у водорослей-макрофитов, отмечается, что данный фермент реагирует на комплексное загрязнение, в том числе и органикой [Мильчакова, Шахматова, 2007]. Его активность выше в условиях загрязнения. В экспериментах на микроводорослях было показано, что каталаза реагирует на более высокие концентрации дизельного топлива в среде по сравнению с другими ферментами антиоксидантной системы (супероксиддисмутаза и т.д.) [Ramadass et al., 2017].

Можно предположить, что используемая в эксперименте добавка ДТ вызывает окислительный стресс в клетках водорослей, что подтверждается повышением активности каталазы. Однако значительного усиления/подавления активности фермента не происходило. По-видимому, валовое содержание НП на уровне 20 ПДК не является критичным для существования водорослей.

Также синтез антиоксидантных ферментов находится в обратной зависимости от концентрации хлорофиллов. Такие данные имеются для микроводорослей [Ramadass et al., 2017]. В нашей работе под действием дизельного топлива концентрации хлорофилла *a* и каротиноидов снижались в 3–4 раза по сравнению с контролем. Это может свидетельствовать о более активной выработке антиоксидантных ферментов (в частности, супероксиддисмутаза) у опытных растений.

Для оценки фоновой концентрации НП были проанализированы пробы воды и водорослей, отобранные в районе губы Зеленецкой. Валовое содержание НП в природной воде составило 192 мкг/л (около 4 ПДК). Таким образом, анализируемые нами водоросли до эксперимента обитали в слабо загрязненной НП среде. Качественный состав НП представлен в основном *n*-алканами $C_{11}-C_{25}$ в диапазоне концентраций 0,1–5,3 мкг/л. Углеводородная «гребенка» на хроматограммах при этом характеризуется монотонным распределением гомологов, что указывает на преимущественно нефтяной источник алканов [Немировская, Зарецкас, 2001]. Дополнительно для выявления их генезиса использовались следующие соотношения: C_{17}/C_{18} , пристан/фитан (Pr/Ph), CPI (отношение нечетных к четным гомологам) в области $C_{13}-C_{22}$, а также показатель биогенности $(C_{15} + C_{17})/2C_{16}$ [Немировская, Зарецкас, 2001]. Расчетные данные показали низкие значения (<1) соотношений C_{17}/C_{18} , Pr/Ph и CPI ($C_{13}-C_{22}$), что в сочетании с невысокой суммарной концентрацией алканов (37 мкг/л) может указывать на постоянный, но малоинтенсивный нефтяной источник поступления алканов в экосистему изучаемого региона, вероятнее всего,

связанный с водным транспортом. Значение показателя $(C_{15} + C_{17})/2C_{16}$ составило >2 , что свидетельствует также о присутствии в воде алканов биогенной природы. Что касается самой водоросли, то характер углеводородной «гребенки», распределение *n*-алканов в *P. palmata* и значения перечисленных выше расчетных показателей также указывают на преимущественно нефтяное происхождение этих алканов, адсорбированных водорослью из водной среды. Исключение составляет *n*-гептадекан (C_{17}), который, вероятнее всего, продуцируется самой водорослью [Миронов, 1985; Немировская, Зарецкас, 2001]. Другие алканы также могут быть синтезированы водорослью, однако их содержание относительно *n*-гептадекана невелико. Повышенное содержание *n*- C_{17} типично для природных сред с автохтонным (морским) биогенным составом УВ [Немировская, Зарецкас, 2001].

После внесения в морскую воду 1 мг/л ДТ (0 суток эксперимента) валовое содержание НП составило 1049 мкг/л, а сумма 17 алканов достигла 386 мкг/л. Результаты эксперимента с *P. palmata* отражены на рисунках 6.3–6.5. В эксперименте пальмария продемонстрировала выраженную способность к постепенной очистке воды от внесенных НП. В присутствии пальмарии валовое содержание НП и сумма алканов в воде на 21-е сутки эксперимента уменьшились в несколько раз по сравнению с началом эксперимента (0 суток, ДТ) и составили соответственно 226 мкг/л и 35 мкг/л, что практически соответствует уровню контрольного образца до внесения ДТ (рис. 6.3).

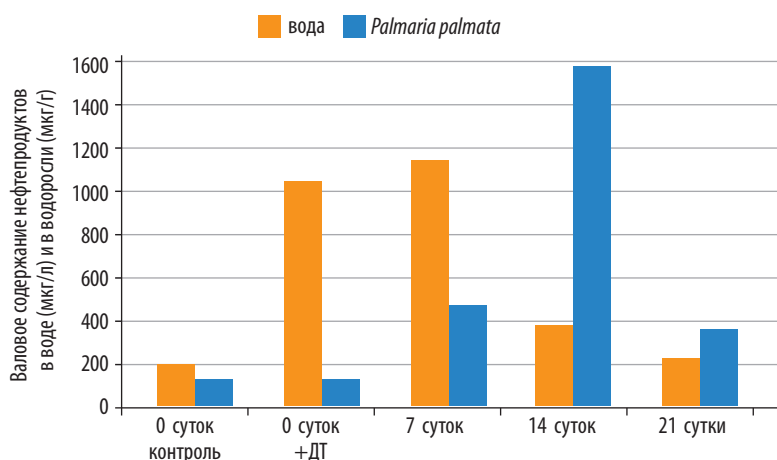


Рис. 6.3. Изменение валового содержания НП в воде и в водоросли *P. Palmata* в течение эксперимента

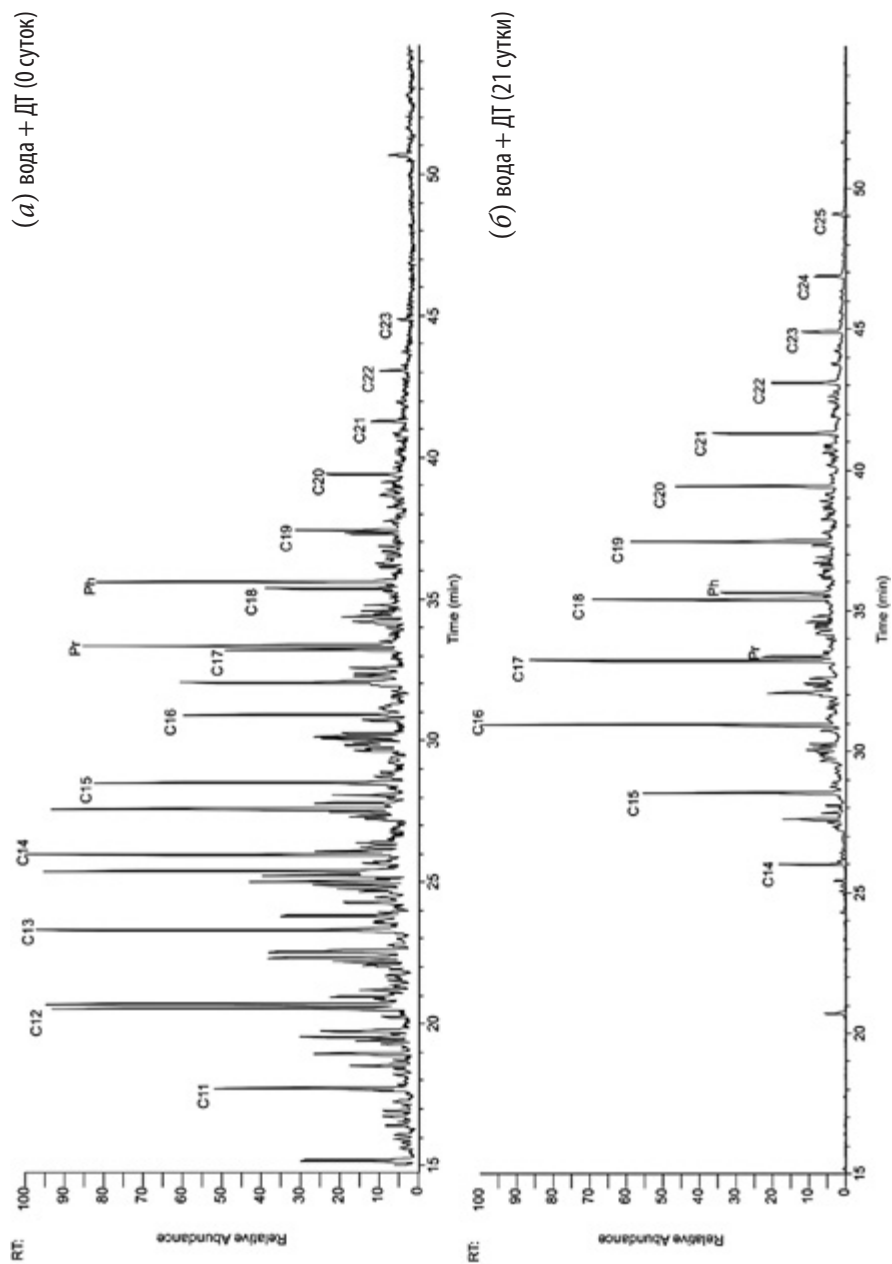


Рис. 6.4. Масс-хроматограммы проб воды на начальной и конечной стадиях эксперимента с *P. palmata* в режиме регистрации характеристичного для алканов иона

Результаты исследования индивидуальных соединений в образцах воды демонстрируют активный процесс трансформации алканов с течением времени. На хроматограммах наблюдается постепенное смещение максимума углеводородного «горба» в сторону более «легких» соединений, а также увеличение относительного содержания разветвленных алканов (рис. 6.4). Результаты анализа также показали отсутствие в воде и водорослях окисленных структур (альдегидов, кетонов), что позволяет предположить, что деструкция внесенных НП идет преимущественно за счет уменьшения длины алкильной цепочки.

В контрольном образце водоросли (0 суток эксперимента) валовое содержание НП составило 124 мкг/г, а сумма 17 алканов – 30 мкг/г. В течение эксперимента в водоросли максимальные значения валового содержания НП и суммы алканов наблюдались на 14-е сутки – 1586 мкг/г и 249 мкг/г соответственно. На 21-й день содержание анализируемых показателей в водоросли *P. palmata* уже значительно снижается (рис. 6.3, рис. 6.5). Исключение составляет н-гептадекан, который, являясь эндогенным соединением, накапливается в тканях водоросли.

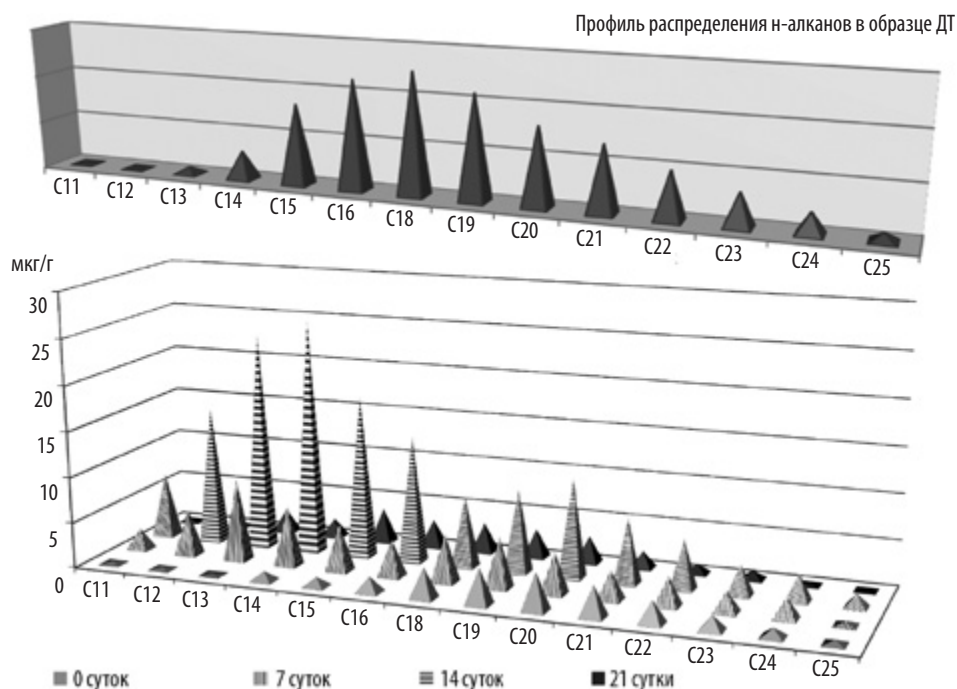


Рис. 6.5. Содержание индивидуальных алканов в водоросли на разных стадиях эксперимента с *P. palmata* (исключены изопреноиды пристан и фитан, а также н-гептадекан C_{17} как эндогенный компонент)

Из диаграммы на рисунке 6.5 видно, что в процессе эксперимента помимо изменения концентрации н-алканов происходит изменение профиля их распределения (для сравнения на рисунке 6.5 отдельно приведен характерный профиль распределения алканов дизельного топлива). Это может свидетельствовать не только о накоплении НП талломом водоросли, но и об их деструкции.

В условиях умеренного загрязнения нефтепродуктами водоросль *Palmaria palmata* сохраняет физиологическую активность, проявляет выраженную способность к сорбции и деструкции НП. При этом уменьшение содержания компонентов ДТ в воде идет параллельно с их накоплением в водорослях. По-видимому, деструкция ДТ пальмарией происходит, как и у исследованных ранее водорослей (ульварии и фукуса), всем талломом: начинается на поверхности водоросли с помощью эпифитных УОБ, – что обеспечивает поглощение и нейтрализацию НП клетками растения. Об этом свидетельствует стабильная метаболическая активность клеток *P. palmata* под влиянием ДТ на протяжении всего эксперимента (21 сутки). В пользу данного предположения свидетельствует отмеченное для нескольких видов водорослей увеличение численности эпифитных углеводородоокисляющих бактерий на их поверхности в условиях загрязнения НП среды обитания. Результаты проведенного исследования и полученные ранее данные по влиянию ДТ на водоросли-макрофиты показывают способность большой группы макроводорослей к очистке морской среды от НП независимо от строения и систематической принадлежности. Предполагается, что основным фактором участия макроводорослей в биоремедиации является возможность образовывать симбиотические ассоциации с углеводородоокисляющими микроорганизмами.

6.2. Использование ферментов антиоксидантной системы для оценки физиологического состояния водорослей-макрофитов в условиях загрязнения нефтепродуктами

Морские прибрежные экосистемы постоянно испытывают на себе антропогенное воздействие, и для оценки его влияния на биоценозы необходимо анализировать состояние их отдельных компонентов: растений, животных, микроорганизмов. Растения, в частности водоросли, являются интересными объектами для исследования, так как по изменению их морфофизиологических параметров (скорости роста, интенсивности

фотосинтеза, концентраций пигментов и т.д.) можно оценить не только величину/силу, но и длительность антропогенного воздействия. Водоросли-макрофиты перспективны для определения воздействия органических и неорганических загрязнителей, поскольку они, как правило, являются наиболее распространенными формами жизни в прибрежной зоне. Выделяют несколько уровней исследования: фитоценотический – где рассматривается изменение видового состава, смена доминантов; физиологический – исследование скорости роста, интенсивности фотосинтеза/дыхания, активности ферментов; биохимический – особенности накопления веществ (аминокислот, полисахаридов) и т.д. В настоящее время широкий интерес вызывает возможность использования ферментов антиоксидантной системы (АОС) как маркеров состояния живых организмов в условиях антропогенной нагрузки [Torres et al., 2008]. Ферменты АОС обезвреживают активные формы кислорода (АФК), образование которых сопровождает разные метаболические процессы – фотосинтез, дыхание, азотфиксацию и т.д. [Vardi et al., 1999]. Интенсивность синтеза ферментов антиоксидантной системы является видоспецифичным признаком, определяется также периодом физиологической активности, стадией развития.

Кроме внутренних особенностей организма, на активность ферментов будут оказывать влияние абиотические и антропогенный факторы. Изменение интенсивности их воздействия вызывает формирование стресса у организма, наличие которого проявляется в увеличении концентрации активных форм кислорода в клетках и стимуляции синтеза ферментов АОС.

Высокие концентрации антиоксидантов будут иметь решающее значение для регуляции уровня фотоокислительного стресса, вызванного снижением энергопотребляющей способности в результате действия разных групп ксенобиотиков [Okamoto et al., 2001].

Основными ферментами АОС являются супероксиддисмутаза (СОД), каталаза, пероксидаза и т.д. и ряд неферментных соединений, таких как каротиноиды, флавоноиды, фенольные соединения (например флоротаннины). В зависимости от вида и величины воздействия будет различаться и ответная реакция ферментов. Например, для *F. vesiculosus*, произрастающего в условиях Арктики, было показано, что условия низких температур воздуха и/или сочетание низких температур воздуха и высокой освещенности подавляет работу каталазы, тогда как активность СОД не изменяется [Collén, Davison, 2001]. У красной водоросли *Palmaria*

palmata на изменение температуры среды обитания реагирует и СОД, и каталаза [Добычина, Рыжик, 2019].

И если изменение активности ферментной системы в ответ на действие ряда факторов абиотической среды (температура, освещенность) отчасти выявлено, то реакция на нефтепродукты (в частности на дизельное топливо) изучена достаточно слабо.

Наиболее популярными и доступными для измерения являются ферменты АОС: супероксиддисмутаза, каталаза, глутатионпероксидаза и аскорбатпероксидаза; также часто используется как маркер наличия стресса перекисное окисление липидов (ПОЛ), концентрация перекиси водорода.

Сравнение природного уровня показателей антиоксидантной системы у водорослей

Для сравнения были выбраны представители трех групп водорослей, относящихся к доминирующим группам.

Было показано, что содержание перекиси водорода уменьшается в ряду *U. obscura* < *P. palmata* < *F. vesiculosus* (рис. 6.6а).

Активность каталазы снижается от *U. obscura* > *P. palmata* > *F. vesiculosus* (рис. 6.6б). Из трех исследованных видов активность СОД у *P. palmata* максимальна, а минимальна – у *F. vesiculosus* (рис. 6.6в).

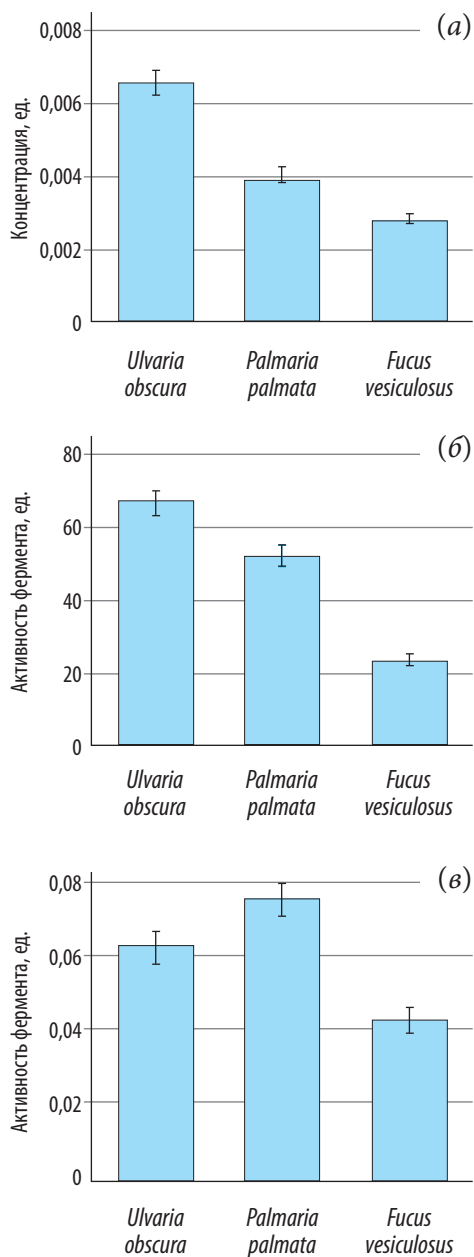


Рис. 6.6. Активность ферментов АОС водорослей в природе:
(а) – перекись водорода,
(б) – каталаза,
(в) – супероксиддисмутаза

Изменения в экспериментальных условиях под воздействием токсиканта

На следующем этапе было проанализировано изменение показателей работы АОС после внесения в среду обитания токсиканта (дизельное топливо). Эксперименты были поставлены в лаборатории в термостатированном помещении при температуре воздуха $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$, постоянном освещении 150 Вт/м^2 и аэрации среды. Растения, которые использовали для эксперимента, предварительно акклиматизировали к условиям лаборатории в течение 7 суток. В экспериментальные сосуды с водорослями добавляли дизельное топливо в концентрации 20 мкл/л , содержали их в течение 14 суток. В тех же условиях находились контрольные сосуды. По окончании эксперимента у контрольных и опытных образцов определяли показатели состояния АОС.

Анализ результатов измерений показал, что у *U. obscura* и *P. palmata* активность ферментов изменяется в ходе эксперимента. У *F. vesiculosus* различия между контрольными и экспериментальными образцами не зафиксированы.

Под воздействием дизельного топлива у *U. obscura* и *P. palmata* концентрация перекиси водорода в клетках снижается, у *F. vesiculosus* – увеличивается (рис. 6.7а)

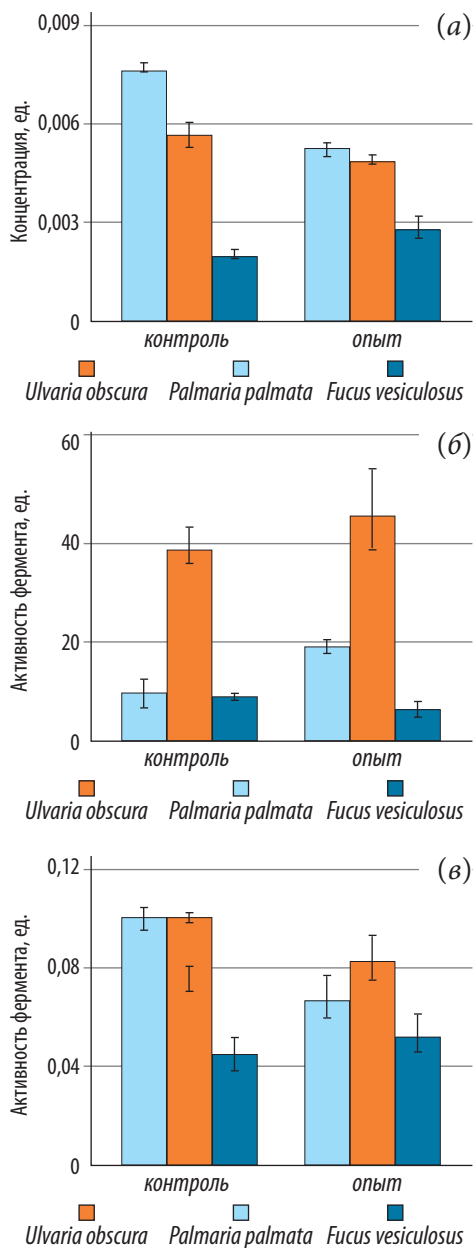


Рис. 6.7. Изменение показателей активности ферментов АОС под воздействием дизельного топлива: (а) – перекись водорода, (б) – каталаза, (в) – супероксиддисмутаз

Активность каталазы у опытных образцов *U. obscura* увеличивается практически в 2 раза по сравнению с контролем, у *P. palmata* незначительно увеличивается, у *F. vesiculosus* контрольные и опытные образцы по активности фермента не различаются (рис 6.7б).

Активность СОД у опытных образцов *U. obscura* и *P. palmata* снижается в 1,5 раза по сравнению с контролем, для *F. vesiculosus* различий в активности не отмечено (рис. 6.7в).

Подобные различия в реакции ферментов на действие ксенобиотика могут определяться рядом причин: природой токсиканта, видом растения, стадией его жизненного цикла и т.д. [Torres et al., 2008]. Так, ранние стадии развития (молодые проростки, зиготы, гаметы) являются более чувствительными, чем взрослые, так как последние способны адаптироваться к подобному воздействию, в том числе за счет активации АОС, синтеза белков теплового шока и т.д. Исследования с использованием химических диспергаторов для ликвидации разливов нефти показали, что благодаря синтезу белков теплового шока в водорослях происходит усиление устойчивости к сырой нефти [Wolfe et al., 1998]. При этом некоторые концентрации нефтепродуктов способны оказывать стимулирующее воздействие на организм [Lewis, Pryor, 2013].

Уровень токсичности НП для организма обусловлен и особенностями строения водорослей. Для фукусовых водорослей характерно сложное внутреннее строение с наличием дифференциации клеток на слои, на поверхности таллома формируется относительно плотный кутикулярный слой [Рыжик, 2005]. На нем развиваются разные виды бактерий, в том числе способные к окислению нефтепродуктов [Pugovkin et al., 2016]. Предположительно проникновение нефтепродуктов к нижележащим слоям замедляется именно благодаря наличию этого слоя и деятельности бактерий, которые обезвреживают адсорбированные нефтепродукты [Grande et al., 2012]. Для *U. obscura* характерна однослойная пластина, которая не имеет защитного слоя, и при попадании на поверхность таллома нефтепродукт достаточно быстро проникает внутрь клеток. *P. palmata* занимает промежуточное положение между ними: у нее несколько слоев клеток, на поверхности есть небольшой кутикулярный слой, который замедляет проникновение токсиканта.

Так как водоросли к моменту проведения экспериментов сохранили свою жизнеспособность, можно предположить, что они успешно справ-

ляются со стрессовыми условиями. У зеленых и у красных водорослей в снижении уровня АФК принимают участие комплекс СОД – каталаза. У *F. vesiculosus* в эксперименте активность каталазы не изменяется, возможно, это связано с тем, что для анализа использовались только конечные показатели, а не рассматривались изменения активности фермента в динамике. Возможно, к моменту снятия эксперимента частично токсичные компоненты были обезврежены, что и способствовало снижению активности фермента. В отличие от каталазы, СОД у растений из более грязных мест была выше [Колбеева и др., 2017]. Возможно, при загрязнении нефтепродуктами у фукусовых водорослей активируется другая система, ответственная за обезвреживание АФК. Например, вторым основным ферментом у фукусовых и пальмариид будет выступать аскорбат-пероксидаза (АРХ), которая восстанавливает пероксиды до H_2O или соответствующих спиртов соответственно, используя аскорбат в качестве донора электронов [Torres et al., 2008]. В качестве антиоксидантов могут выступать каротиноиды и полифенолы. Каротиноиды участвуют в стабилизации липидной фракции фотосинтетических мембран, чем сохраняют их функциональную целостность, гасят электронно-возбужденные молекулы [Cantrell et al., 2003], такие как O_2 ·, которые способны индуцировать разрушение ДНК [Torres et al., 2008], зачастую они действуют совместно с полифенолами [Rajendran et al., 2004; Kokowicz Pilatti et al., 2016]. Другим вспомогательным механизмом удаления H_2O_2 является образование летучих галоуглеродов (например, бромформа, хлороформа и трихлорэтилена) из ванадий-бромпероксидаз. Данный механизм в большей степени характерен для красных водорослей, подверженных как биотическим, так и абиотическим стрессам [Dring, 2006].

Сравнение активности каталазы у *Fucus vesiculosus* из Кольского залива

В качестве примера использования показателя активности каталазы (АК) для оценки воздействия можно привести исследование фермента у водорослей из разных по степени загрязнения мест Кольского залива.

В летний период (июль – август) у *Fucus vesiculosus* из Кольского залива АК уменьшалась в ряду: Абрам-мыс – Росляково – Минькино – Североморск – Белокаменка (рис. 6.8) и изменялась в пределах от 14,06 до 30,12 Мкат/л.

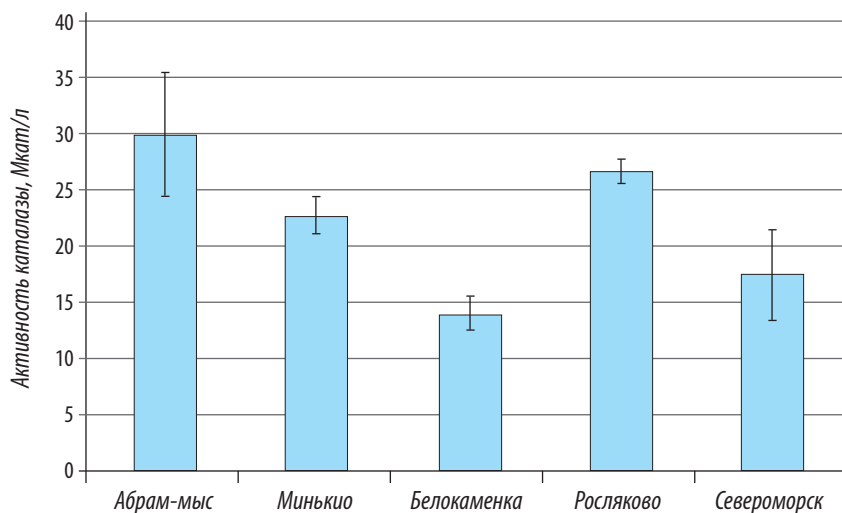


Рис. 6.8. Активность каталазы в клетках апикального участка таллома *Fucus vesiculosus* из различных мест обитания

В загрязненных местах максимальная АК отмечена в районе пос. Абрам-мыс и Росляково, минимальная – Белокаменка и Североморск. Проведенные ранее исследования показали, что у растений в местах с постоянным загрязнением уровень каталазы выше, чем в экологически чистых местах [Шахматова, Мильчакова, 2009; Shachmatova, Ryzhik, 2020], то есть по уровню активности каталазы можно судить о степени загрязнения.

Тот факт, что в Североморске, Белокаменке активность каталазы невелика (особенно по сравнению с контролем), не говорит об отсутствии загрязнения, скорее всего, его доля ниже, чем в других исследованных местах. Эти точки располагаются на разных берегах залива: западный берег – Абрам-мыс, Минькино, Белокаменка и восточный берег – Росляково и Североморск. Разница в показателях может определяться рядом факторов: присутствием источника загрязнения (порт, терминал нефтепродуктов), характером течения и сноса нефтяных пятен – и гидрохимическими и морфологическими особенностями побережья: изрезанность береговой линии и наличие бухт, преобладающий тип грунта, опреснение и т.д. Анализ характера движения нефтяного пятна, представленный в книге [Кольский залив ... 2018], показал, что при определенной силе ветра пятно от терминала в Белокаменке будет двигаться на противоположный берег – в сторону Сафоново, основная нагрузка будет приходиться на литоральные биоценозы в этом районе. В Североморске место отбора проб не находилось вблизи порта и постоянного источника загрязнения.

Высокий уровень загрязнения в районе Абрам-мыса может быть обусловлен как постоянным присутствием загрязнителя, так и тем, что данный район подвержен распреснению: низкая соленость способствует более быстрому выходу нефтепродуктов из пленки в толщу воды. В южном колене залива преобладает загрязнение хозяйственно-бытовыми стоками. Сравнение 3 точек (Новый мост, Абрам-мыс и Белокаменка) в течение 10 лет по содержанию нитратов и фосфатов показало, что максимально загрязнен хозяйственно-бытовыми стоками район Нового моста (по отдельным показателям наблюдается превышение ПДК), наиболее «чистое» место – район пос. Белокаменка. Район у пос. Абрам-мыс занимает промежуточное положение [Овчинникова и др., 2012].

В среднем колене Кольского залива, по данным Государственного доклада о состоянии окружающей среды [Государственный доклад ... 2015], содержание растворимых нитратов и фосфатов не превышает ПДК. По мере продвижения к выходу из залива начинает увеличиваться доля загрязнения нефтепродуктами и продуктами деятельности промышленных предприятий.

Реакция каталазы на присутствие в среде ксенобиотиков неспецифична. На изменение активности фермента влияет большое количество факторов: освещенность, температура, стадия жизненного цикла, антропогенное загрязнение. Так как отбор проб осуществлялся в один период и различия в освещенности и температуре были минимальны, то можно предположить, что на изменение АК в первую очередь будет влиять антропогенное загрязнение.

Таким образом, у растений в условиях постоянного загрязнения уровень каталазы изменяется. Как правило, это проявляется в повышении активности фермента. Однако при анализе изменений активности каталазы необходимо учитывать особенности произрастания растений и характер (продолжительность воздействия, величина) загрязнения. В районе пос. Абрам-мыс в первую очередь влияют хозяйственно-бытовые стоки, которые вносят основной вклад в повышение активности каталазы, тогда как в районе пос. Росляково, Североморске – загрязнение нефтепродуктами.

Итак, рассматриваемое нами воздействие дизельного топлива является эволюционно новым для организмов. Водоросли различаются по устойчивости к токсиканту, у них будут активироваться различные системы антиоксидантной защиты.

У *Ulvaria obscura* в эксперименте выявлена хорошая ответная реакция каталазы и СОД на воздействие нефтепродуктами, данный комплекс

можно использовать для оценки воздействия токсикантов на жизнеспособность водоросли.

У *Palmaria palmata* под воздействием токсиканта происходило изменение активности СОД, фермент каталаза оказался менее чувствителен.

У *Fucus vesiculosus* в условиях постоянного антропогенного загрязнения АК выше по сравнению с растениями из экологически чистых районов. В экспериментах данный показатель не всегда выявляет четко выраженную ответную реакцию.

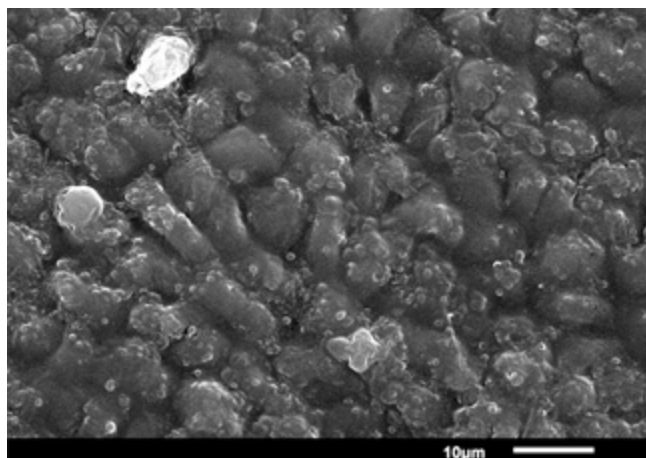
6.3. Количественные характеристики эпифитных бактериальных сообществ водорослей *Fucus vesiculosus*

Известно, что углеводородокисляющие бактерии, образующие с водорослями-макрофитами взаимовыгодную симбиотическую ассоциацию, могут окислять почти все нефтепродукты, скорость деградации которых зависит от соотношения углеводородов [Ильинский и др., 2010; Семенов и др., 2014; Ramadass et al., 2017]. Как отмечалось выше, деструкция НП у ульварии и фукуса происходит всем талломом, начинаясь на поверхности водоросли, с помощью эпифитных УОБ, что обеспечивает поглощение и нейтрализацию НП клетками растения. Были разработаны и апробированы технологии санитарных водорослевых плантаций (СВП), в основе биотической компоненты которых использовались фукусовые водоросли, преимущественно *Fucus vesiculosus*.

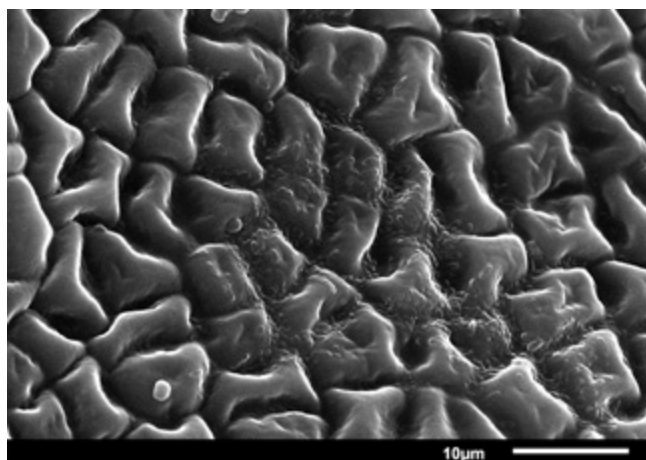
В ходе работы проводились электронно-микроскопические исследования поверхности водорослей *F. vesiculosus* с прикрепленными бактериями. У водорослей, отобранных из чистых и хронически загрязненных нефтепродуктами акваторий, анализировался характер количественного распределения культивируемых гетеротрофных бактерий (в том числе углеводородокисляющих) по таллому. Во время локального краткосрочного разлива в губе Зеленецкой проведено сравнение численности бактерий (общей численности, численности культивируемых сапротрофных и углеводородокисляющих бактерий) на водорослях, обитающих в эпицентре разлива и на удалении от него.

Поверхность таллома у фукуса пузырчатого неоднородна и не является гладкой (рис. 6.9). Большая часть клеток микроорганизмов локализуется в углублениях. На открытых, ровных участках отмечаются единичные бактериальные клетки. Это может объясняться тем, что в природных

условиях в водной среде постоянно наблюдается движение водных масс, которое может препятствовать массовому поселению и закреплению бактерий на открытых участках.



(а)

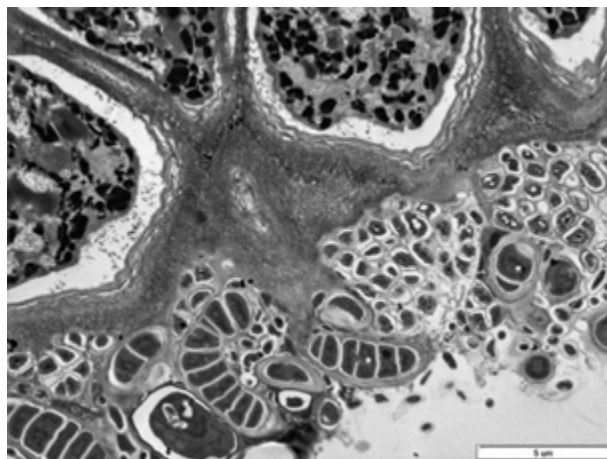


(б)

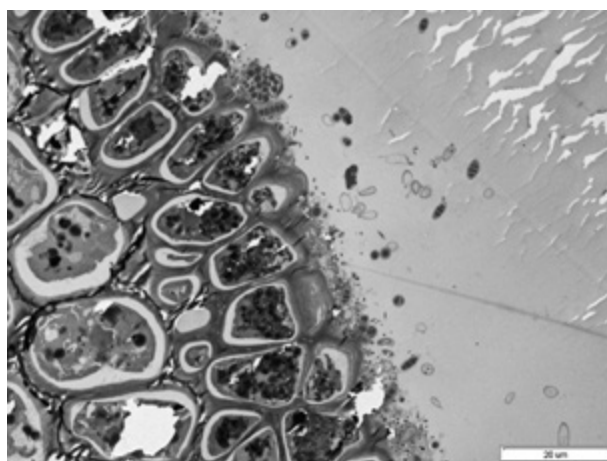
Рис. 6.9. Электронно-микроскопические фотографии поверхности водорослей *E. vesiculosus*. Увеличение: (а) – $\times 3500$, (б) – $\times 12500$

Распределение эпифитных бактерий (ЭБ) и их численность зависит также от влияния факторов среды, в том числе и антропогенных. При значительном загрязнении среды (и водорослей) нефтепродуктами большая часть бактерий располагается непосредственно на поверхно-

сти, в слизистом слое водорослей (рис. 6.10) либо концентрируется на пленке или под пленкой нефтепродуктов, адсорбирующей на талломах фукуса и создающей дополнительные условия для бактериальной колонизации.



(а)



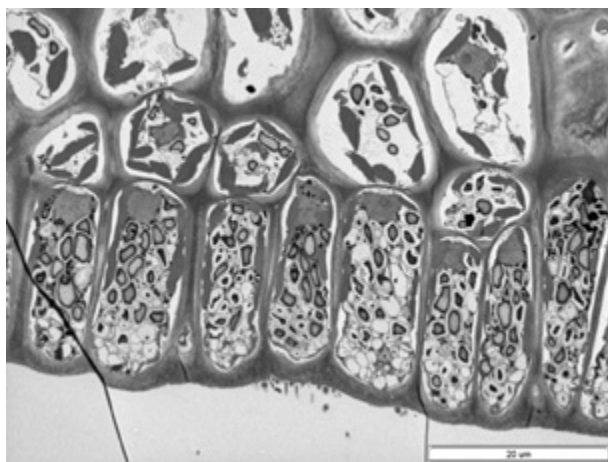
(б)

Рис. 6.10. Эпифитные бактерии и цианобактерии на поверхности *F. vesiculosus* из загрязненной акватории. Увеличение: (а) – $\times 6400$, (б) – $\times 3500$

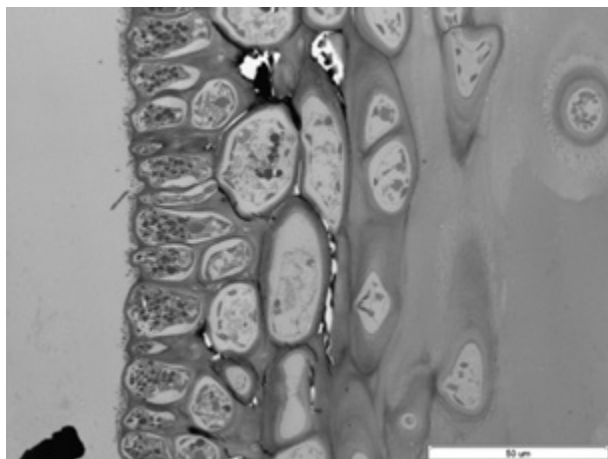
Помимо гетеротрофных бактерий на поверхности водорослей, отобранных в загрязненной НП морской воде, обнаружено большое количество цианобактерий (рис. 6.10). Отмечаются как одиночные клетки, так

и цепочки. Обнаружены колониальные формы, представляющие собой «упакованные» мелкие (1–2 мкм) клетки, заключенные в единую оболочку. Характерной особенностью эпифитных цианобактериальных сообществ, обитающих в акватории с ярко выраженным хроническим загрязнением, являлось отсутствие гетероцист у колониальных форм.

На поверхности водорослей из чистых акваторий отмечено значительно меньшее количество эпифитных гетеротрофных бактерий, чем на водорослях из загрязненных районов (рис. 6.11). Колоний и отдельных клеток цианобактерий в этом случае не отмечалось.



(a)



(б)

Рис. 6.11. Эпифитные бактерии и цианобактерии на поверхности *F. vesiculosus* из чистой акватории. Увеличение: (a) – $\times 3200$, (б) – $\times 1800$.

Численность пелагических форм бактерий в разные сезоны года может различаться в десятки раз [Ильинский, 2000; Перетрухина, 2006] и быть привязанной к гидрологическому режиму и развитию фитопланктона, в частности динофлагеллят [Бардан и др., 1990]. Однако отмечаются случаи, когда в течение года не наблюдалось ярко выраженных изменений количества бактерий и структура бактериального сообщества оставалась устойчивой. Сезонные изменения численности эпифитных бактерий (особенно общей, по прямому счету) менее выражены, чем у пелагических форм, что связывается со специфическими условиями существования эпифитных микроорганизмов [Перетрухина, 2006].

В нашем случае колебания количества культивируемых эпифитных бактерий в губе Зеленецкой в различные сезоны года были незначительными и составляли от нескольких десятков до тысяч клеток, в зависимости от участка таллома (рис. 6.12).

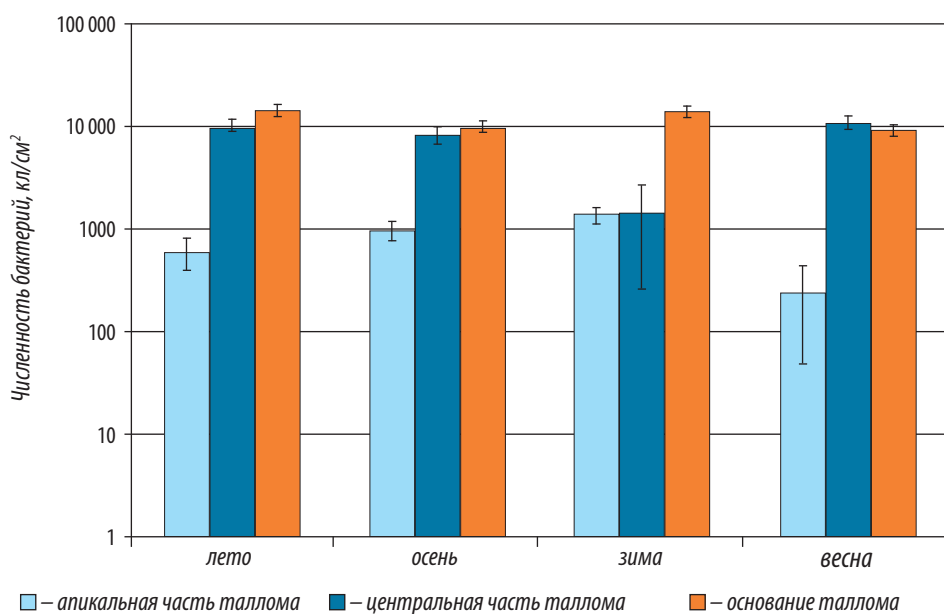


Рис. 6.12. Сезонные изменения численности культивируемых эпифитных бактерий в трех различных частях талломов фукусов из губы Зеленецкой

Численность культивируемых сапротрофных (СБ) и УОБ на поверхности *F. vesiculosus* увеличивается по направлению от апикальной части таллома к нижней, наиболее старой (рис. 6.13).

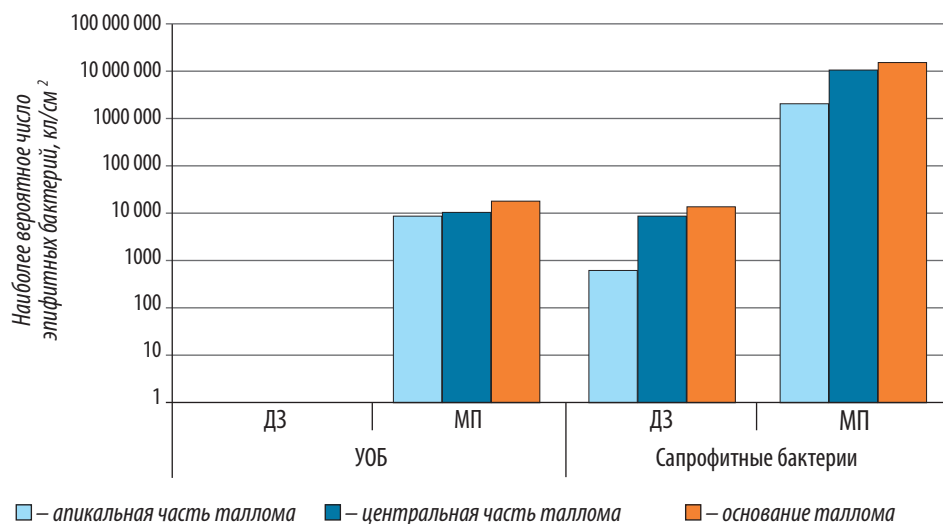


Рис. 6.13. Численность эпифитных сапрофитных и углеводородокисляющих бактерий на различных участках талломов фукусов из загрязненной НП акватории Мурманского морского порта (МП) и чистой акватории вблизи пос. Дальние Зеленцы (ДЗ)

Максимальное количество культивируемых эпифитных СБ на поверхности фукуса из акватории с хроническим загрязнением НУ превышала 17 млн кл/см² и была обнаружена в нижней части таллома. Минимальное количество бактерий отмечено в верхушечной части таллома фукуса – около 2 млн кл/см². Количество УОБ на талломе фукуса из загрязненного местообитания было на два – три порядка меньше, чем СБ в чистом районе, и колебалось от 9,5 до 17,4 тыс. кл/см², в то же время на поверхности талломов фукусов из акватории ДЗ их обнаружено не было. Максимальное количество УОБ на фукусе из загрязненной НУ акватории было обнаружено на нижнем участке таллома, минимальное – на верхушечном.

Влияние нефтяного загрязнения на численность и таксономический состав эпифитных гетеротрофных бактерий, обитающих на фукусах в губе Зеленецкой

Пробы фукусов отбирали на загрязненной НУ станции, в районе причала, где находилось затонувшее судно, из которого наблюдался постоянный выход ДТ в воду. В результате концентрация НУ в воде возле причала достигала 0,26 мг/л (в 5 раз выше ПДК), а на удалении более 500 м от него она снижалась до 0,04 мг/л, т.е. не превышала ПДК (0,05 мг/л).

В качестве фоновой, чистой станции для отбора проб нами был выбран участок литорали, находящийся на значительном удалении от упомянутого выше источника загрязнения.

Общая численность эпифитных бактерий (ОЧБ) на фукусе, обитающем в районе причала, составила $(3,86-4,93) \times 10^7$ кл/см² (рис. 6.14) и оказалась примерно в 3 раза выше, чем на фукусе из чистого местообитания $(1,42-1,48) \times 10^7$ кл/см².

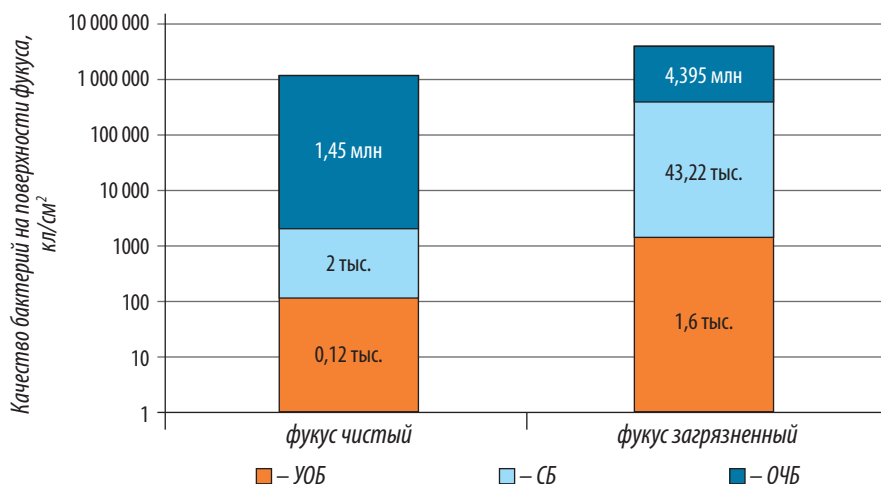


Рис. 6.14. Численность эпифитных бактерий фукуса пузырчатого в загрязненном и чистом районах губы Зеленецкой

Полученные нами данные в целом соответствуют таковым, представленным в литературе и касающимся исследования ЭБ других водных растений. К примеру, обнаруженные нами значения численности ЭБ на талломах фукуса соответствуют максимальным величинам этого показателя ($2,18 \times 10^7$ кл/см²), ранее обнаруженным для талломов морской травы *Zostera marina* [Tornblom, Sondergaard, 1999]. Микробиологические исследования талломов водорослей *Saccharina latissima* (*Laminaria saccharina*) из чистого местообитания показали, что величина ОЧБ на центральной части пластины составила $2,88 \times 10^8$ кл/см², а для меристематической области этот показатель был ниже – $2,09 \times 10^8$ кл/см² [Oberbeckmann et al., 2007]. Эти данные значительно превышают полученные нами величины общей численности ЭБ на талломах фукуса.

Численность СБ на поверхности макрофитов, отобранных в загрязненном НУ участке губы, была более чем на два порядка выше, чем на водорослях, отобранных на чистом участке акватории.

Сходная картина наблюдалась и для эпифитных УОБ – их количество на талломах фукуса из района причала оказалось более чем на порядок выше, чем на водорослях, отобранных на удалении от него.

Из полученных нами данных также следует, что численность СБ (рис. 6.13) в воде и на фукусах, взятых на чистой и грязной станциях, существенно превосходит количество УОБ, что является вполне естественным, поскольку не все СБ способны к окислению НУ. При этом если на чистой станции численность эпифитных СБ превышает таковую УОБ примерно на порядок, то на фукусе из загрязненной акватории эта разница увеличивается уже более чем на два порядка. Причины этого явления, вероятнее всего, связаны с резкими перестройками в составе эпифитного бактериоценоза на фукусе из загрязненной акватории.

Для водорослей *Eisenia bicyclis* из Японского моря [Shiba, Taga, 1980] определенная численность бактерий составляла 10^1 – 10^4 кл/см².

В проведенных ранее исследованиях бурых водорослей было показано, что максимальные значения численности культивируемых эпифитных бактерий в южном колене Кольского залива составляли около 68 тыс. кл/см² [Перетрухина, 2006]. В нашей работе обнаруженное количество культивируемых микроорганизмов значительно превышало эти показатели (≈ 430 тыс. кл/см²) и было в 6,35 раз больше. Различия в количестве культивируемых бактерий можно объяснить различиями методов, используемых для удаления бактериальных клеток с поверхности таллома.

Таким образом, численность эпифитных СБ, к которым относятся и УОБ, существенно возрастает на фукусах со станции, подверженной загрязнению НУ. Участок акватории бухты в районе причала подвержен также влиянию берегового стока (за счет впадения в него пресноводных ручьев), что тоже может быть причиной возрастания численности ЭБ обеих групп. При этом на численности бактерий в воде загрязнение вод НУ сказывается в гораздо меньшей степени, чем на численности ЭБ на талломах фукуса. Возможно, это связано с аккумуляцией НУ на поверхности талломов фукуса, что делает эти поллютанты более доступными для ЭБ. В воде при небольших разливах нефти и нефтепродуктов подобное явление наблюдается только в области поверхностной пленки, где концентрируются эти поллютанты. Поскольку для микробиологических анализов мы отбирали пробы воды с глубины 1 м, то содержание НУ здесь было невелико и они по этой причине не оказывали на численность СБ (включая и УОБ) существенного влияния.

6.4. Роль водорослей-макрофитов в биоремедиации прибрежных акваторий арктических морей от нефтепродуктов на примере Кольского залива Баренцева моря

Кольский залив Баренцева моря имеет протяженность 57 км и занимает одно из ведущих мест в Арктике по транспортировке и перегрузке НП. На побережье залива уже построены и идет строительство новых комплексов по переработке углеводородного сырья. Залив считается одним из самых загрязненных морских водоемов на Кольском полуострове. Проблема загрязнения усугубляется тем, что в течение большей части года температура воды в заливе немногим превышает 0 °С. При данной температуре естественное разложение НП сильно замедлено. Большая роль в очистке воды от НП принадлежит микроорганизмам, в том числе микроводорослям [Atlas, 1978; Ильинский, 1995; Wrabel, Peckol, 2000], но в полярную ночь их вклад в биоремедиацию уменьшается. В Кольском заливе содержание НП в воде (фоновое) варьирует от 0,04 (около 1 ПДК) до 2,3 (46 ПДК) мг/л, при значении 1 ПДК = 0,05 мг/л. Проведенные ранее исследования показали, что фоновое содержание НП в губах мурманского побережья в летне-осенний период колеблется от 3 до 8 ПДК, совершенно чистых губ, не содержащих НП, обнаружено не было. В зимний и весенний периоды в ряде губ содержание НП было 1–2 ПДК в связи с усилением движения судов, преимущественно рыболовецких, весной и его затуханием поздней осенью [Воскобойников и др., 2017; Кольский залив, 2018]. Наиболее высокая концентрация НП в заливе отмечается в южном колене в районе мурманской нефтебазы, торгового порта, причалов «Атомфлота», перегрузочных комплексов в среднем колене, что объясняется имеющимися источниками загрязнения: причалами, судоходством, происходящей заправкой судов, перегрузкой топлива из стоящих на рейде многотонных танкеров. В период разливов НП их концентрация в воде достигала 25–50 мг/л (500–1000 ПДК) и выше [Кольский залив ... 2018].

В последние годы обсуждается возможность участия водорослей-макрофитов в ремедиации морской воды от нефтепродуктов. Было показано, что многие виды водорослей-макрофитов Баренцева моря проявляют устойчивость к влиянию НП. Диапазон толерантности различается даже у видов, близких по систематике и по строению, однако все исследованные нами и другими авторами в предшествующих работах макроводоросли (12 видов) демонстрировали способность к аккумуляции НП из морской воды на поверхности таллома, их деструкции с помощью эпифитных углеводородокисляющих бактерий, последующе-

му поглощению и нейтрализации НП в тканях растений. Выявлено, что уменьшение содержания НП в воде идет параллельно с его увеличением в талломах водорослей. Исследования, проведенные в этом направлении, позволили создать доказательную базу, подтверждающую способность макроводорослей, различающихся по строению и систематической принадлежности, к сорбции и деструкции нефтепродуктов. На основе симбиотической ассоциации макроводорослей и УОБ были созданы биотехнологии плантаций-биофильтров для очистки прибрежных акваторий от нефтепродуктов [Pilatti et al., 2016; Pugovkin et al., 2016; Воскобойников и др., 2017, 2018; Ryzhik et al., 2019].

В литературе неоднократно выдвигались предположения о возможной роли прибрежных фитоценозов в биоремедиации морской воды от различных токсикантов [Миронов, 1985; Патин, 2017]. Однако конкретных сведений и расчетов, основанных на натурных или лабораторных экспериментах, не приводилось. В большей мере это можно объяснить отсутствием мониторинговых работ по оценке запасов, видового разнообразия макроводорослей в описываемых акваториях. Так, исследования водорослей Мурманского побережья, осуществленные в 80–90-е годы XX в. Мурманским морским биологическим институтом и Полярным научно-исследовательским институтом морского рыбного хозяйства и океанографии [Макаров, 1998; Пельтихина, 2005], в которых внимание уделялось и фитобентосу Кольского залива, к сожалению, касались только ламинариевых водорослей, в то время единственному водорослевому промысловому объекту в Баренцевом море.

В рамках представленных в данной монографии исследований были выполнены расчеты участия макрофитобентоса в биоремедиации от НП для конкретного водоема – Кольского залива. В основу расчетов положены результаты экспедиционных наблюдений последних лет о распределении и биомассе доминантных представителей фитобентоса (7 видов): *Fucus vesiculosus*, *F. distichus*, *F. serratus*, *Ascophyllum nodosum*, *Saccharina latissima* (Phaeophyceae), *Palmaria palmata* (Rhodophyta), *Ulvaria obscura* (Chlorophyta) в трех районах (коленах) Кольского залива. Параллельно натурным наблюдениям проведены лабораторные анализы способности нейтрализации дизельного топлива у указанных выше видов водорослей, выполнена оценка их суммарной роли в биоремедиации от ДТ Кольского залива.

Данные исследования, надеемся, внесут вклад в понимание роли прибрежных фитоценозов в биоремедиации морской воды от НП не только на Баренцевом море, но и в других прибрежных акваториях Мирового океана.

Лабораторные эксперименты по влиянию НП на водоросли

Объекты исследования – бурые водоросли (Phaeophyceae): фукоиды *Ascophyllum nodosum*, *Fucus vesiculosus*, *F. distichus* и *F. serratus*, ламинариевая водоросль *Saccharina latissima*, зеленая (Chlorophyta) *Ulvaria obscura* и красная (Rhodophyta) *Palmaria palmata*. Талломы, приблизительно равные по размеру и массе, отбирали в губе Зеленецкая Баренцева моря (69°07'09" с.ш., 36°05'35" в.д., рис. 6.15), в типичном местообитании: *S. latissima* – в сублиторали с глубины примерно 3 м, остальные виды – на литорали. Водоросли очищали от обрастателей и помещали в стеклянные емкости с морской водой объемом 1,3 л, за исключением *S. latissima*, опыты с которой из-за большего размера образцов проводились в стеклянных банках объемом 3 литра. Морскую воду соленостью 33 ‰ для проведения экспериментов отбирали из мест обитания водорослей, далее фильтровали через ватно-марлевый фильтр и добавляли в нее летнее ДТ в количестве 6,5 мг/л, что составляет 130 ПДК для воды по валовому содержанию НП. Морскую воду и ДТ не стерилизовали. Опыт проводили в термостатируемом боксе при температуре 7–8 °С, освещении 16–18 Вт/м² и постоянной аэрации воды. Общая продолжительность опыта с определением морфофункционального состояния составила 10 суток. Валовое содержание НП в воде и водорослях методом газовой хроматографии/масс-спектрометрии (ГХ/МС) было определено в начале и через 5 суток с начала эксперимента. Пробоподготовку и инструментальный анализ выполняли по описанной ранее методике [Воскобойников и др., 2018]. Для оценки фонового уровня НП анализировали пробы воды и водорослей из губы Зеленецкая. Расчеты содержания ДТ в водорослях были выполнены на сухую массу с учетом коэффициента соотношения сырой/сухой массы: сахарины – 7/1; фукоиды – 5/1; пальмари, ульвари – 4/1. В течение опыта изменение состояния и морфологии таллома водорослей контролировали визуально и с помощью светооптических методов с использованием микроскопа МИКМЕД-6.

Оценка биомассы и запасов водорослей в Кольском заливе

Оценку запасов водорослей-макрофитов производили по традиционной методике [Пельтихина, 2005]. Материал был отобран в экспедициях ММБИ КНЦ РАН в 2009–2019 гг. (при частичной финансовой поддержке ВОО «Русское географическое общество»). Осмотр значительной части

береговой линии залива позволил составить описание распределения макрофитобентоса, определить размеры пояса фукоидов для оценки их запасов.

Для расчета биомассы макрофитобентоса и отдельных видов водорослей выполняли отбор количественных проб методом пробных площадей, закладываемых вдоль трансекты, перпендикулярной урезу воды. На всем протяжении залива было заложено 15 трансект, в южном и среднем коленях работы проводили раз в два года (рис. 6.15). Площадь рамки при отборе проб на литорали – 0,25 м², в сублиторали – 1,0 м². На каждом разрезе выполняли станции на верхнем, среднем и нижнем горизонтах литорали (ВГЛ, СГЛ, НГЛ), около 3,0, 1,5 и 0,5 м над уровнем моря соответственно, в сублиторали на глубинах 5, 10 и 15 м. На каждой станции отбирали по три пробы. Ширина пояса вида оценивалась в среднем для участка сравнительно однородной растительности не менее 500 м протяженностью. Доминирующие виды и проективное покрытие дна водорослями оценивали визуально. Отбор проб в сублиторали осуществляли с помощью легководолазного снаряжения. Протяженность участков литорали с определенными типами сообществ оценивали в программе MapWiever 8.0. Топографическая основа – контур береговой линии навигационных карт для Кольского залива, оцифровано специалистами ММБИ РАН.

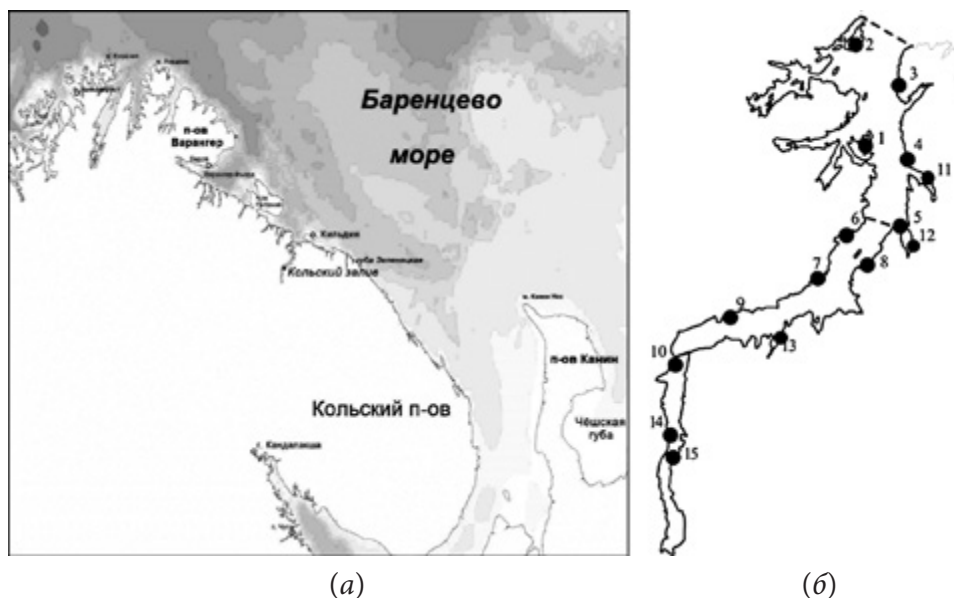


Рис. 6.15. Район работ: (а) – Кольский залив и губа Зеленецкая Баренцева моря; (б) – станции отбора проб в Кольском заливе

Распределение, запасы и биомасса водорослей-макрофитов в Кольском заливе

Рассматриваемые четыре вида фукоидов распределены на литорали Кольского залива неравномерно.

Fucus vesiculosus встречается повсеместно от эстуария реки Тулома до устья залива, используя для прикрепления различный субстрат, в том числе гидротехнические сооружения. Максимум запасов обнаруживается на литорали среднего колена. На большей части литорали биомасса *F. vesiculosus* составляет около 1 кг/м^2 , но благодаря большой площади, занимаемой данным видом, его запасы очень велики (табл. 6.1). На ряде участков литорали среднего колена биомасса достигает $9,4 \pm 0,3 \text{ кг/м}^2$. Общий запас в заливе – 2274,3 т, что в пересчете на сухую массу составляет 453 т.

Fucus distichus произрастает на среднем и нижнем горизонтах литорали всего Кольского залива. Наибольшая биомасса отмечена на валунных пляжах в среднем и северном коленах залива – до $6,9 \pm 3,4 \text{ кг/м}^2$, но запасы его сосредоточены в южном колене, где вид покрывает обширные песчаные пляжи. На отвесных скалах биомасса не более 1 кг/м^2 . Общий запас в заливе составляет 1959,5 т, что в пересчете на сухую массу составляет 453 т.

Ascophyllum nodosum обитает преимущественно на защищенных или слабозащищенных от волнового воздействия валунных пляжах, значительного развития его заросли достигают на островах с подветренной стороны. В северном колене его биомасса достигает $4,2 \pm 0,8 \text{ кг/м}^2$. Общий запас в заливе – 371,4 т сырой массы, что в пересчете на сухую массу составляет 74 т.

Fucus serratus распространен главным образом в северном колене залива, высокая биомасса ($6,1 \pm 1,5 \text{ кг/м}^2$) отмечена на острове Екатерининский. Общие запасы *F. serratus* оцениваются в 114 т сырой массы, что в пересчете на сухую массу составляет 22,7 т.

Saccharina latissima образует заросли в северном колене залива, встречающиеся в небольшом количестве в среднем в сублиторали на глубине 4–6 м. Запасы сахараины составляют 450 т сырой массы, что соответствует 64,3 т сухой массы.

Palmaria palmata приурочена к крупнокаменистому субстрату, встречается преимущественно в среднем и нижнем горизонтах литорали в среднем и южном коленах залива. Запасы составляют 155,3 т сырой массы, что соответствует 38,8 т сухой массы.

Ulvaria obscura присутствует фрагментарно на литорали в трех коленах залива. Запасы составляют 5,38 т сырой массы (1,35 т сухой массы).

Ульвария занимает разнообразные субстраты: от каменистых до деревянных сооружений, металлических бортов, брошенных на литорали судов.

**Потенциальный вклад водорослей-макрофитов
в сорбцию нефтепродуктов:
результаты экспериментов**

Содержание НП у водорослей-макрофитов в месте обитания (при концентрации НП в воде 0,2 мг/л – 4 ПДК) было следующим:

F. vesiculosus – 25 мкг/г;

F. distichus – 24 мкг/г;

F. serratus – 28 мкг/г;

A. nodosum – 18 мкг/г;

S. latissima – 1980 мкг/г;

P. palmata – 124 мкг/г;

U. obscura – 1,4 мкг/г.

Визуальные и светооптические наблюдения не показали каких-либо изменений у талломов фукуса после 5 и 10 суток пребывания в морской воде с дизельным топливом при концентрации 6,5 мг/л – 130 ПДК. Не наблюдалось изменения цвета таллома, а в клетках – плазмолиза, изменений цвета пластид, вакуолизации, описанных ранее при влиянии на водоросли других повреждающих факторов [Ryzhik et al., 2019].

Через 5 суток эксперимента содержание ДТ у 4 видов фукусовых водорослей, сахарины, пальмари и ульварии составило в расчете на сухой вес:

F. vesiculosus – 1036 мкг/г,

F. distichus – 870 мкг/г;

F. serratus – 641 мкг/г;

A. nodosum – 236 мкг/г;

S. latissima – 10740 мкг/г;

P. palmata – 856 мкг/г;

U. obscura – 128 мкг/г.

В таблице 6.1 приведены усредненные данные о поглощении дизельного топлива исследованными видами водорослей за сутки и объем поглощенного ДТ в разных частях Кольского залива. Также показаны результаты расчетов суммарного суточного вклада изученных водорослей в ремедиацию залива от НП с учетом определенных их общих запасов.

Таблица 6.1

**Удельная скорость поглощения ДТ водорослями-макрофитами, мкг/г/сут.,
и расчетные объемы поглощения ДТ водорослями-макрофитами
в разных частях Кольского залива, кг/сут.**

Вид	Поглощение ДТ, мкг/г/сутки	Объем поглощенных нефтепродуктов, кг			
		северное колесо	среднее колесо	южное колесо	весь залив
<i>F. vesiculosus</i>	202,0	12,4	64,2	17,2	93,8
<i>F. distichus</i>	169,0	13,8	22,8	31,6	68,2
<i>A. nodosum</i>	44,0	0,8	2,2	0,8	3,8
<i>F. serratus</i>	123,0	3,0	0	0	3,0
Фукусовые, всего	538,0	30,0	89,2	49,6	168,8
<i>S. latissima</i>	1752,0	138,0			138,0
<i>P. palmata</i>	146,4	4,4			4,4
<i>U. obscura</i>	25,4	0,17			0,17
Всего		168,6	92	51,9	312,5

Наиболее высокая концентрация НП в заливе отмечается в южном колесе в районе мурманской нефтебазы, торгового порта, причалов атомфлота, перегрузочных комплексов в среднем колесе, что объясняется имеющимися источниками загрязнения: причалами, судоходством, происходящей заправкой судов, перегрузкой топлива из стоящих на рейде танкеров. В период локальных разливов НП их концентрация в воде достигала 50 мг/л (1000 ПДК) и выше [Кольский залив ... 2018].

В проведенных экспериментах у всех исследованных макрофитов была выявлена устойчивость к дизельному топливу в концентрации 6,5 мг/л, что составляет 130 ПДК. У водорослей не были отмечены признаки повреждения после 10 суток нахождения в экспериментальных условиях.

Анализ содержания НП у водорослей-макрофитов, отобранных для экспериментов (при концентрации НП в воде в месте обитания 0,2 мг/л – 4 ПДК), показал, что исследованные водоросли различаются по способности к поглощению НП, но если среди трех видов рода *Fucus* эти различия незначительны – от 24 мкг/г у *F. distichus* до 28 мкг/г у *F. serratus*, то *U. obscura* поглощала НП в 6 раз меньше – 1,4 мкг/г, а пальмария, наоборот, в 5 раз больше. Сахарина накапливала ДТ при данной концентрации в воде в 80 раз больше, чем фукусы.

При более высоких концентрациях НП в воде уровень поглощения ДТ водорослями несколько меняется (табл. 6.1). Максимальный уровень

показывает также сахарина: 1752 мкг/г в сутки, – которая поглощает в 3,3 раза больше, чем суммарно это выполняют все фукусовые водоросли. Пальмария при относительно высоких концентрациях ДТ в воде уступает по уровню поглощения ДТ не только сахарине, но и двум видам фукуса (табл. 6.1).

Основные источники загрязнения в Кольском заливе сосредоточены в южном и среднем колене. Именно там идут перегрузочные работы углеводородного сырья, причем часть из них производится в среднем колене с крупнотоннажных танкеров, стоящих на рейде, работают судоремонтные предприятия, доки, нефтебазы. По литературным данным, нефтепродукты, попавшие в воду в результате разливов, преимущественно оказываются на литорали [Патин, 2017; Кольский залив ... 2018], т.е. в месте произрастания фукусов, пальмарии, которые выполняют в данной ситуации роль природного биофильтра. Фукус наиболее устойчив к НП среди исследованных водорослей. Ранее нами отмечалась способность у *F. vesiculosus* переживать длительное время в условиях постоянного загрязнения: на литорали на камнях в слое мазута – «шоколадного мусса», вблизи нефтяных баз, портов. Водоросли сохраняли жизненные функции, но показатели функциональной активности были на более низком уровне по сравнению с образцами фукуса пузырчатого из чистых мест обитания [Воскобойников и др., 2017]. Остальные виды фукуса показывают меньшую устойчивость к загрязнению, но тем не менее тоже выживают длительное время при покрытии поверхности пленкой НП, участвуют в их детоксикации [Степаньян, Воскобойников, 2006]. Значительная способность к аккумуляции и нейтрализации НП показана и у *P. palmata*.

Сравнивая объемы потенциально поглощенного водорослями ДТ, прежде всего необходимо отметить, что основную роль в биоремедиации играют фукусовые водоросли. *Ulvaria obscura* по запасам и способности к поглощению имеет наименьшие значения среди исследованных водорослей: 5,38 т сырой массы и 25,4 мкг/г сырой массы в сутки соответственно.

Таким образом, исследованные водоросли-макрофиты могут нейтрализовать 312 кг дизельного топлива за одни сутки. Данный объем НП по современной классификации соответствует среднему локальному разливу нефтепродуктов в морской воде [Постановление ... 2000]. На эффективность участия водорослей в биоремедиации оказывают влияние следующие факторы: 1) температура, свет, гидродинамика, соленость (на физиологическое состояние водорослей и количественный, качественный состав, углеводородоксиляющую активность микроорганизмов – эпифи-

тов водорослей) и 2) состав нефтепродуктов. В данном исследовании мы, остановившись на основных участниках прибрежных фитоценозов, не смогли учесть вклада в биоремедиацию Кольского залива еще большой группы водорослей, которые являются обитателями залива, представителями различных систематических групп, из-за отсутствия данных об их способности к превращению НП. Включение этих сведений может значительно увеличить значимость водорослей-макрофитов в биоремедиации прибрежных акваторий, хотя и уже сейчас она несомненна.

Итак, экосистема Кольского залива выдерживает хроническое нефтяное загрязнение на протяжении более ста лет благодаря стечению нескольких обстоятельств. В заливе большая часть береговой линии занята валунными пляжами, на которых сложились сообщества фукусовых водорослей с очень высокой биомассой. Эти сообщества обеспечивают постоянную очистку вод от НП, берут на себя основную нагрузку по нейтрализации не только НП, растворенных в воде, но и «пленочных» форм токсикантов [Воскобойников и др., 2017].

В сублиторали ламинариевые водоросли, развиваясь на отдельных валунах, образуют заросли на глубине от 2,5 до 15 м и очищают воду от диспергированных НП. Эффективность участия ламинариевых водорослей в биоремедиации, отмеченная в нашем исследовании, во многом обеспечивается большой площадью поверхности соприкосновения с нефтепродуктами и, возможно, высокой численностью на поверхности таллома эпифитных углеводородокисляющих бактерий.

В водах Кольского залива постоянно присутствуют углеводородокисляющие микроорганизмы, которые перерабатывают НП [Перетрухина и др., 2006; Pugovkin et al., 2016]. Можно считать установленным наличие в природных прибрежных экосистемах естественного механизма утилизации нефти и нефтепродуктов. Несомненно, для водорослей-макрофитов существуют летальные дозы НП, что нами было показано экспериментально [Воскобойников и др., 2017], которые делают эту систему крайне чувствительной к крупным разливам нефти или продуктам ее переработки. Очевидно, что использование бактериями в качестве источника энергии столь калорийного продукта, как углеводороды, которые формировались в земной коре миллионы лет, было очень вероятным событием. Удивительной является выявленная возможность у бурых, красных и зеленых водорослей поглощать углеводороды, поскольку необычно, в отличие от других автотрофов, использование в метаболизме альтернативных углекислому газу источников углерода. В основе этой возможности лежит

способность образовывать симбиотические ассоциации водорослями-макрофитами и углеводородокисляющими бактериями [Семенова и др., 2009; Pugovkin et al., 2016; Воскобойников и др., 2017, 2018].

Известно значение фукусовых и ламинариевых водорослей в морских экосистемах как продуцентов органического вещества. Представленное исследование показало, что роль водорослей-макрофитов сводится не только к созданию первичной продукции и регуляции содержания углекислого газа и кислорода. Заросли бурых водорослей – важная составляющая системы репарации и гомеостаза в прибрежных экосистемах, о существовании которой ранее не подозревали. При этом необходимо понимать, что уничтожение даже части природных сообществ водорослей может изменить баланс, существующий в экосистеме.

В связи с этим видится необходимым предостеречь проектировщиков и строителей новых предприятий на побережье Кольского залива от засыпки грунтом литоральной зоны залива для расширения береговой части. Литоральная зона – основная зона обитания фукусовых водорослей, которые, как показало наше исследование, являются природным биофильтром, во многом обеспечивающим чистоту вод Кольского залива.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Россия – морская держава. Это обстоятельство определяет жизненно важный ресурс развития страны в XXI в. и приоритетность всестороннего изучения морских экосистем в условиях глобальных климатических и индустриальных воздействий. Волны холода на юге России, усиление шквалов и смерчей в Азово-Черноморье, экстремальные паводки в бассейнах дальневосточных и европейских морей, аномальная ледовитость сибирских морей в конце лета и другие подобные факторы вносят неопределенность в хозяйственные и экосистемные сценарии. Фундаментальные исследования природы морей России, эволюции океаносферы от побережья, шельфа и до дна океанических впадин позволят получить новые знания и разработать технологии оперативных прогнозов опасных явлений. Понимание происходящих процессов невозможно без использования многолетних баз данных и реконструкции палеоклимата, материкового оледенения, палеоокеанологии, изучения стока крупных рек и озер в океан. Проведение научно-исследовательских работ, направленных на своевременное выявление деструктивных природных процессов, и популяризация полученных результатов на фоне происходящих климатических изменений являются крайне необходимыми.

Опасные природные явления происходят в разное время и в разных масштабах, и каждое из них является по-своему уникальным. Снижение ущерба от опасных природных явлений и катастроф – одна из приоритетных задач, решаемых на глобальном, национальном и местном уровнях. Согласно информации, опубликованной на сайте Всемирной метеорологической организации [Всемирная метеорологическая организация], глобальный ожидаемый среднегодовой ущерб (AAL) в антропогенной среде, связанный с тропическими циклонами (ветер и штормовой нагон), землетрясениями, цунами и наводнениями, в настоящее время оценивается в 314 млрд долларов США [Глобальный аналитический доклад ...]. Жизни людей и имущество можно защитить посредством точных прогнозов и предупреждений в простой для понимания форме и просвещения

населения по мерам подготовки к подобным опасным явлениям до того, как они станут бедствиями [Всемирная метеорологическая организация].

В Российской Федерации уже имеются и продолжают развиваться информационные технологии для предотвращения или снижения потерь от стихийных бедствий. Так, после разрушительного цунами 1952 г. на Дальнем Востоке была внедрена система контроля и оповещения, успешно действующая и в настоящее время. В Краснодарском крае в 2012 г., после наводнения в Крымске, была создана сеть автоматического измерения уровня воды в реках Черноморского побережья и на речной системе Кубани. Свою сеть гидрометеопостов развивает и Южный научный центр РАН.

Как внутренние моря (Азовское и Каспийское), так и северные моря европейской части России (например, Белое и Баренцево) оказывают значительное влияние на жизнедеятельность населения и на хозяйственную инфраструктуру. Интенсивная антропогенная деятельность приводит к существенным перестройкам экосистем, их загрязнению различными компонентами (нефтепродуктами, радионуклидами, промышленными отходами, микропластиком и др.) и трансформации биотических сообществ. В ходе реализации нескольких проектов Российского фонда фундаментальных исследований в рамках Программы «Опасные явления» были проведены работы по выявлению современных тенденций развития наиболее опасных природных явлений в Азовском море, возможности их математического моделирования и прогноза, развитию систем мониторинга.

Показано, что многие неблагоприятные явления в Азовском море и Приазовье обусловлены особенностями строения и развития этого мелководного бассейна после окончания последнего ледникового периода. Наблюдаемое на протяжении голоценового межледниковья повышение уровня Азовского моря приводит к неуклонному разрушению берегов и расширению акватории, изменению строения и конфигурации аккумулятивных береговых тел (кос, отмелей и береговых валов). Изменение характера и объемов стока рек Дон и Кубань вызывает заметную смену интенсивности характера осадконакопления и заиление. Отмечается увеличение доли мелкодисперсных частиц (пелитовой и алевроитовой фракции) в донных отложениях. С этими же илистыми слоями связывают накопление увеличенного количества $C_{орг}$, радионуклидов и других компонентов, что приводит к трансформации биоты Азовского моря, рыбопромысловая значимость которого и так значительно уменьшилась в последние десятилетия из-за целого ряда факторов (зарегулирования

стока крупных рек, повышения солености, биоинвазии чужеродных видов и др.). Недостаточно учитываются в развитии прибрежных инфраструктур и такие природные явления, как морские течения и сейши.

Многие явления природного и антропогенного характера возможно прогнозировать, кроме того, необходимо оценивать ущербы, риски, а также эффективность осуществляемой деятельности. В частности, было проведено математическое моделирование распределения солености в Таганрогском заливе и низовьях р. Дон в ходе стонных и нагонных явлений, амплитуда которых значительно увеличилась в последнее время. Другая модель позволяет оценивать глубинные структурные процессы в экосистеме при изменении качественных и количественных показателей. Установлены взаимосвязи между видовым составом и биоразнообразием донных сообществ, среднегодовой биомассой и численностью бентоса, уровнем антропогенного воздействия, информационной активностью пользователей соцсетей, гидрологическими параметрами и др.

Биота и биопродуктивность водоемов важны не только для обеспечения хозяйственных и пищевых потребностей человечества. Их влияние и свойства многообразнее. Одним из явлений, осложняющим функционирование судов и прибрежной инфраструктуры, является эффект обрастания их подводных частей. Экспериментально в условиях Нижнего Дона была изучена интенсивность формирования сообществ обрастания на разных материалах и их сезонная динамика.

В ходе исследований в Кольском заливе Баренцева моря показано, что бурые, красные и зеленые водоросли способны эффективно поглощать углеводороды (в т.ч. нефтепродукты) благодаря способности образовывать симбиотические ассоциации водорослями-макрофитами и углеводородокисляющими бактериями. Поэтому заросли в первую очередь бурых водорослей – важная составляющая системы репарации и гомеостаза в прибрежных экосистемах. В связи с этим нужно отметить важность сохранения литоральной зоны, в которой обитают макроводоросли, являющиеся природным биофильтром, во многом обеспечивающим чистоту вод.

Анненкова Н.П. Пресноводные и солоноватоводные Polychaeta СССР // Определители организмов пресноводных вод СССР. Пресноводная фауна. Л.: Изд-во АН СССР, 1930. Вып. 2. С. 1–47.

Артюхин Ю.В., Алексеев В.В. Бентогенная аккумуляция на берегах и шельфе морей. Апатиты: Изд-во КНЦ АН СССР, 1989. 84 с.

Балабанов И.П., Измайлов Я.А. Изменение уровневого и гидрохимического режимов Черного и Азовского морей за последние 20 тысяч лет // Водные ресурсы. 1988. № 6. С. 54–62.

Бардан С.И., Дружков Н.В., Байтаз В.А., Челейкин С.А., Крымский А.В. Комплексный экологический мониторинг в губе Дальнезеленецкая (Баренцево море): летне-осенний период 1989 г. Структурные характеристики: препринт. Апатиты: Изд-во КНЦ АН СССР, 1990. 36 с.

Белявский П.Е. Донские гирла. Гидрографическое исследование: с пятью планами. Одесса: Типография Ульриха и Шульце, 1872. 336 с.

Беркович К.М., Тимофеева В.В. Морфология и направленные деформации русла Нижнего Дона // Геоморфология. 2007. № 3. С. 54–62.

Беспалова Л.А., Дуюн И.Н., Ивлиева О.В. и др. Формирование ландшафтов Таганрогского залива // Современное развитие эстуарных экосистем на примере Азовского моря. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1999. С. 243–249.

Брайко В.Д., Бэческу М., Виноградов К.А. Простейшие, черви. Определитель фауны Черного и Азовского моря. Киев: Наукова думка, 1968. Т. 1. 426 с.

Бронфман А.М. Формирование и антропогенное изменение стока взвешенных наносов Азовского моря // Географические аспекты изучения гидрологии и гидрохимии Азовского бассейна. Л., 1981. С. 43–45.

Бронфман А.М., Дубинина В.Г., Макарова Г.Д. Гидрологические и гидрохимические основы продуктивности Азовского моря. М.: Пищевая промышленность, 1979. 288 с.

Бронфман А.М., Хлебников Е.П. Азовское море. Основы реконструкции. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 271 с.

Булгаков Н.Г. Индикация состояния природных экосистем и нормирование факторов окружающей среды. Обзор существующих подходов // Успехи современной биологии. 2002. Т. 122. № 2. С. 115–135.

Булышева Н.И., Сёмин В.Л., Савикин А.И., Шохин И.В., Терсков Е.Н. Макрозообентос дельты Дона осенью 2014 г. // Окружающая среда и человек. Современные проблемы генетики, селекции и биотехнологии: мат-лы междунар. науч. конф. и молодежной науч. конф. памяти чл.-корр. РАН Д.Г. Матишова. Ростов н/Д.: Изд-во ЮНЦ РАН, 2016. С. 333–336.

Варченко Е.А., Курс М.Г. Натурные испытания металлических материалов в морской воде: ключевые подходы к оценке стойкости к коррозии и биоповреждению // Труды ВИАМ. 2017. № 11. (dx.doi.org/ 10.18577/2307-6046-2017-0-11-12-1).

Вернадский В.И. Химическое строение биосферы Земли и ее окружения. М.: Наука, 1965. 348 с.

Вознесенский В.Л., Заленский О.В., Семихатова О.А. Методы исследования фотосинтеза и дыхания растений. Л.: Наука, 1965. 305 с.

Волкова В.Н., Денисов А.А. Теория систем. М.: Высш. шк., 2006.

Воробьев В.П. Бентос Азовского моря // Тр. АзЧерНИРО. 1949. Т. 13. С. 1–193.

Воскобойников Г.М., Ильинский В.В., Лопушанская Е.М., Макаров М.В., Пуговкин Д.В., Рыжик И.В., Ляймер А.В., Йенсен Д.Б. Санитарная водорослевая плантация для очистки прибрежных акваторий от нефтепродуктов: от теории к практике // Вопросы современной альгологии. 2017. № 3 (15). С. 160–186.

Воскобойников Г.М., Матишов Г.Г., Метелькова Л.О., Жаковская З.А., Лопушанская Е.М. Об участии зеленой водоросли *Ulvaria obscura* в биоремедиации морской среды от нефтепродуктов // Доклады РАН. 2018. Т. 481. № 1. С. 111–113.

Всемирная метеорологическая организация. Официальный сайт. URL: <https://public.wmo.int/ru>

Герасимов Ю.Л. Санитарная и техническая гидробиология: уч. пос. Самара: Изд-во «Самарский ун-т», 2014. 48 с.

Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. IV: Черное море. Вып. 1: Гидрометеорологические условия / под ред. Альтмана Э.Н., Сиимонова А.И. СПб.: Гидрометеиздат, 1991. 429 с.

Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. V: Азовское море. СПб.: Гидрометеиздат, 1991. 237 с.

Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том. II: Белое море. Вып. I. Гидрометеорологические условия / под ред. Б.Х. Глуховского. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 240 с.

Глобальный аналитический доклад о мерах по уменьшению опасности бедствий в 2015 году. URL: https://www.preventionweb.net/english/hyogo/gar/2015/en/gar-pdf/GAR15_Pocket_RU.pdf.

ГОСТ 19179-73. Гидрология суши. Термины и определения.

ГОСТ 26185-84. Водоросли морские, травы морские и продукты их переработки. Методы анализа. Введен 01.01.85. М.: Изд-во стандартов, 2004. 34 с.

ГОСТ Р 22.0.03-95. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Природные чрезвычайные ситуации. Термины и определения.

Грушевский М.С. Волны попусков и паводков в реках. Л.: Гидрометеоиздат, 1969. 338 с.

Гудимов А.В., Комарова Е.П. Новый биомониторинг и решение экологических проблем // Экологические проблемы северных регионов и пути их решения: тез. докл. VII Всерос. науч. конф. с междунар. участием, посвящ. 30-летию Института проблем промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН и 75-летию со дня рождения д-ра биол. наук, профессора В.В. Никонова / под ред. Е.А. Боровичёва, О.И. Вандыш. Апатиты, 2019. С. 114–115.

Гусев М.В., Коронелли Т.В., Линькова М.А., Ильинский В.В. Изучение ассоциации цианобактерий и нефтеокисляющих бактерий в условиях нефтяного загрязнения // Микробиология. 1981. Т. 50. № 6. С. 1092–1097.

Дацюк В.Н., Крукиер Л.А., Чикин А.Л., Чикина Л.Г. Моделирование экстремального наводнения в дельте Дона на многопроцессорных вычислительных системах // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Вычислительная математика и информатика. 2014. Т. 3. № 1. С. 80–88. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21756273>.

Дашкевич Л.В., Кулыгин В. В., Бердников С. В. Многолетнее изменение средней солености Азовского моря: данные наблюдений и модельный расчет // Экология. Экономика. Информатика (7–12 сентября 2014 г.): сб. статей. 2014. № 2. С. 175–182.

Добычина Е.О., Рыжик И.В. Влияние изменения температуры на состояние антиоксидантной системы *Palmaria palmata* Баренцева моря в зимний период // Проблемы Арктического региона: тез. докл. XVIII Междунар. науч. конф. студентов и аспирантов (г. Мурманск, 15 мая 2019 г.). Мурманск, 2019. С. 32–33.

Долгосрочный прогноз важнейших направлений научно-технологического развития на период до 2030 года. URL: <http://www.hse.ru/org/hse/prognoz2030/otrset6>)

Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2015 году» / Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации, 2016. URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii/http_new_mnr_gov_ru_docs_gosudarstvennye_doklady/?special_version=Y

Звягинцев А.Ю. Морское обрастание в северо-западной части Тихого океана. Владивосток: Дальнаука, 2005. 432 с.

Зеленичиков Г.В., Мошкин В.М., Ляшик А.Н. Оценка опасных природных геологических процессов в береговой зоне Таганрогского залива // Геология, география и экология океана: мат-лы Междунар. науч. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения Д.Г. Панова. Ростов н/Д., 2009. С. 129–132.

Зенкович В.П. Берега Черного и Азовского морей. М.: Географиздат, 1958. 370 с.

Зенкович В.П. Основы учения о развитии морских берегов. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 710 с.

Иванов В.В., Коротаев В.Н., Римский-Корсаков Н.А., Пронин А.А., Чернов А.В. Строение поймы и динамика русла Нижнего Дона // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. 2013. № 5. С. 60–66.

Ивлиева О.В. Влияние дампинга грунта на современное осадконакопление в Таганрогском заливе // Дноуглубление, дампинг и охрана водных экосистем: мат-лы науч.-техн. конф. М., 1993. С. 56–58.

Ивлиева О.В. Типы донных отложений Азовского моря // Актуальные проблемы региональной геологии, литологии и минералогии. Ростов н/Д., 2005. С. 78–86.

Ильинский В.В. Бактериопланктон поверхностных вод Центральной Арктики в период календарной весны // Микробиология. 1995. Т. 64. № 5. С. 696–704.

Ильинский В.В. Гетеротрофный бактериопланктон: экология и роль в процессах естественного очищения среды от нефтяных загрязнений: дис. ... д-ра биол. наук. М.: МГУ, 2000. 603 с.

Ильинский В.В., Воскобойников Г.М., Пуговкин Д.В., Комарова Т.И., Адейкина А.А. Влияние нефтяного загрязнения среды на состав и численность гетеротрофных эпифитных бактерий бурой водоросли *Fucus vesiculosus* // Вестник Южного научного центра. 2010. Т. 6. № 2. С. 98–100.

Инжебейкин Ю.И. Колебания уровня Белого моря. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 151 с.

Инжебейкин Ю.И. Особенности длинноволновых движений в Белом море // Океанология. 2005. № 45(3). С. 332–338.

Каблов В.Ф., Костин В.Е., Соколова Н.А. Экологически безопасные противообрастающие покрытия на основе фторопласта // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2010. Т. 12. № 1 (8). С. 2129–2132.

Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33.

Каляев И.А., Мельник Э.В., Клименко А.Б. Система формирования обучающих выборок для идентификации контента с тематикой опасных явлений на основе сквозных технологий цифровой экономики // Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и индустриальных вызовов («Опасные явления»). Ростов н/Д.: Изд-во ЮНЦ РАН, 2019. С. 275–277.

Карпов В.А., Ковальчук Ю.Л., Полтаруха О.П., Ильин И.Н. Комплексный подход к защите от морского обрастания и коррозии. М.: Т-во научных знаний КМК, 2007. 156 с.

Киселева М.И. Многощетинковые черви (*Polychaeta*) Черного и Азовского морей. Апатиты: Кольский научный центр, 2004. 409 с.

Колбеева М.В., Фисак Е.А., Рыжик И.В. 2017. Активность каталазы баренцевоморского вида *Fucus vesiculosus* в условиях антропогенного загрязнения // Флора и фауна урбанизированных территорий в высоких широтах: мат-лы Междунар. науч.-практ. конф. (26–28 апреля 2016 г.). Мурманск, 2017. С. 74–77.

Кольский залив и нефть: биота, карты уязвимости, загрязнение / под ред. д-ра геогр. наук А.А. Шавыкина; ММБИ КНЦ РАН. СПб.: Реноме, 2018. 520 с. DOI: 10.25990/renomespb.w0pj-zq52.

Корень В.И. Математические модели в прогнозах речного стока. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 200 с.

Королюк М.А., Иванова Л.И., Майорова И.Г., Токарев В.Е. Метод определения активности каталазы // Лабораторное дело. 1988. № 1. С. 16–19.

Кукса В.И. Южные моря (Аральское, Каспийское, Азовское и Черное) в условиях антропогенного стресса. СПб.: Гидрометеиздат, 1994. 320 с.

Курчатова И.В. Сейши в Чёрном и Азовском морях // Изв. Центр, гидромет. бюро Цумора. 1925. Вып. 4. С. 149–158.

Ле Блон П., Майсек Л. Волны в океане: в 2-х ч. / пер. с англ. Е. Н. Амбарцумян и др. М.: Мир, 1981.

Ли Б.Д. Разделение, идентификация и количественное определение фотосинтетических пигментов макробентосных водорослей. Экологические аспекты фотосинтеза морских макроводорослей. Владивосток: Изд-во ДВНЦ АН СССР, 1978. С. 38–54.

Лисицын К.И. Геологические условия предполагаемой трассы канала в дельте р. Дона и у южного берега Таганрогского залива // Водная магистраль Волга – Дон – Азовское море. Вып. 3. Технические и экономические материалы. Ростов н/Д.: Северо-Кавказская плановая комиссия при Краевом исполнительном комитете, 1925. С. 123–165.

Макаров В.Н. Сырьевые ресурсы промысловых водорослей // Промысловые и перспективные для использования водоросли и беспозвоночные баренцева и Белого морей. Апатиты: Изд-во КНЦ, 1998. С. 257–272.

Мамыкина В.А. Геологическое строение и рельеф побережья и дна Азовского моря // Вопросы биогеографии Азовского моря и его бассейна. Л., 1977. С. 20–31.

Мамыкина В.А., Хрусталева Ю.П. Береговая зона Азовского моря. Ростов н/Д.: Изд-во РГУ, 1980. 176 с.

Марамзин В.Я. Расчет сейшевых колебаний методом конечных элементов в бассейнах произвольной формы // Теоретические и экспериментальные исследования длинноволновых процессов. Владивосток, 1985. С. 46–67.

Маслова Т.Г., Попова И.А., Попова О.Ф. Критическая оценка спектрофотометрического метода количественного определения каротиноидов // Физиология растений. 1986. Т. 33. С. 615–619.

Матишов Г.Г. Новые данные о геоморфологии дна Азовского моря // Докл. РАН. Т. 409. 2006б. № 3. С. 375–380.

Матишов Г.Г. Природные катастрофы и опасные явления в прибрежных зонах в Азово-Черноморском бассейне // Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и индустриальных вызовов («Опасные явления»). Ростов н/Д.: Изд-во ЮНЦ РАН, 2019. С. 5–6.

Матишов Г.Г. Батиметрия Азовского моря. Карта. Ростов н/Д.: Изд-во ЮНЦ РАН, 2006а.

Матишов Г.Г. Карта донных отложений Азовского моря. Ростов н/Д.: Изд-во ЮНЦ РАН, 2007а.

Матишов Г.Г. Керченский пролив и дельта Дона: безопасность коммуникаций и населения // Вестник Южного научного центра. 2015. Т. 11. № 1. С. 6–15.

Матишов Г.Г. Сейсмопрофилирование и картирование новейших отложений дна Азовского моря // Вестник Южного научного центра. Т. 3. № 3. 2007б. С. 32–40.

Матишов Г.Г., Григоренко К.С. Причины осолонения Таганрогского залива // Доклады Академии наук. 2017. Т. 477. № 1. С. 92–96.

Матишов Г.Г., Григоренко К.С., Московец А.Ю. Механизмы осолонения Таганрогского залива в условиях экстремально низкого стока Дона // Наука Юга России. 2017. Т. 13. № 1. С. 35–43.

Матишов Г.Г., Ковалева Г.В., Ясакова О.Н. Аномальное осолонение в Таганрогском эстуарии и дельте Дона // Наука Юга России. 2016. Т. 12. № 1. С. 43–50.

Матишов Г.Г., Ковалева Г.В., Польшин В.В. Новые данные о скорости седиментации в Азовском море в позднем голоцене // Доклады Академии наук. 2009. Т. 428. № 6. С. 820–823.

Матишов Г.Г., Клещенков А.В. Кубанский паводковый кризис. Климат, геоморфология, прогноз. Крымск, июль 2012 г. Ростов н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН, 2012. 116 с.

Матишов Г.Г., Матишов Д.Г., Бердников С.В., Сорокина В.В., Левитус С., Смоляр И.В. Внутривековые флуктуации климата Азовского моря (по термохалинным данным за 120 лет) // Доклады Академии наук. 2008а. Т. 422. № 1. С. 106–109.

Матишов Г.Г., Матишов Д.Г., Бердников С.В., Яицкая Н.А. Природные катастрофы в Азово-Черноморском бассейне в начале XXI века. Ростов н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН, 2017. 160 с.

Матишов Г.Г., Матишов Д.Г., Гаргона Ю.М. Климатогенные изменения экосистем южных морей в условиях антропогенных воздействий // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2008б. № 3. С. 26–34.

Матишов Г.Г., Польшин В.В. Новые результаты по истории Азовского моря в голоцене // Доклады Академии наук. 2019. Т. 489. № 2. С. 190–194.

Матишов Г.Г., Польшин В.В., Болдырев М.А., Мысливец В.И., Маев Е.Г., Зверев А.С. Новые представления о голоценовых отложениях шельфа Азовского моря (по данным картирования и сейсмопрофилирования

дна) // Экосистемные исследования Азовского, Черного, Каспийского морей и их побережий. Т. IX. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2007. С. 42–50.

Матишов Г.Г., Польшин В.В., Ильин Г.В., Усягина И.С. Динамика радиационного фона в российских морях (новые данные по Азовскому морю) // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2020. Т. 493. № 2. С. 83–87.

Матишов Г.Г., Польшин В.В., Титов В.В., Шевердяев И.В. Голоценовая история азовского шельфа // Наука Юга России. 2019. Т. 15. № 1. С. 42–53.

Матишов Г.Г., Польшин В.В., Шохин И.В. Влияние геоморфологических особенностей дна Азовского моря на распределение бентоса // Вестник Южного научного центра. 2010. Т. 6. № 2. С. 14–20.

Матишов Г.Г., Польшин В.В., Ильин Г.В., Новенко Е.Ю., Карагеоргис А. Закономерности литохимии и палинологии современных донных отложений Азовского моря // Вестник Южного научного центра. 2006. Т. 2. № 4. С. 38–51.

Матишов Г.Г., Усягина И.С., Польшин В.В. Динамика загрязнения Азовского моря изотопом ^{137}Cs в 1966–2013 гг. // Доклады Академии наук. 2015. Т. 460. № 6. С. 716–721.

Матишов Г.Г., Чикин А.Л. Один из подходов к моделированию ветровых течений в Керченском проливе // Доклады Академии наук. Океанология. 2012. Т. 445. № 3. С. 342–345.

Матишов Г.Г., Чикин А.Л., Бердников С.В., Шевердяев И.В. Экстремальное наводнение в дельте Дона (23–24 марта 2013 г.) и факторы, его определяющие // Доклады Академии наук. 2014. Т. 455. № 3. С. 342–345.

Матишов Д.Г., Матишов Г.Г. Радиационная экологическая океанология. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2002. 417 с.

Матишов Д.Г., Матишов Г.Г., Буфетова М.В., Касаткина Н.Е., Моисеев Д.В. Радиоэкологические исследования Азовского моря (по результатам экспедиции 2001 года) // Доклады Академии наук. 2003. Т. 391. № 2. С. 247–249.

Мезингер Ф., Аракова А. Численные методы, используемые в атмосферных моделях / пер. с англ. Л.: Гидрометеиздат, 1979.

Мельник Э.В., Иванов Д.Я., Орда-Жигулина М.В., Орда-Жигулина Д.В., Родина А.А. Применение технологий туманных вычислений в системе мониторинга и прогнозирования опасных природных явлений // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019а. Т. 2. С. 300–311.

Мельник Э.В., Орда-Жигулина М.В., Орда-Жигулина Д.В., Иванов Д.Я., Родина А.А. Применение технологий цифровой экономики при разработке средств мониторинга и прогнозирования опасных процессов и обеспечения безопасности населения и береговой инфраструктуры // Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и промышленных вызовов («Опасные явления»). Ростов н/Д.: Изд-во ЮНЦ РАН, 2019б. С. 289–291.

Мизюк А.И., Коротаев Г.К., Григорьев А.В., Пузина О.С., Лишаев П.Н. Долгопериодная изменчивость термохалинных характеристик Азовского моря на основе численной вихреразрешающей модели // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35. № 5 (209). С. 496–510.

Милячакова Н.А., Шахматова О.А. Каталазная активность наиболее массовых видов черноморских водорослей-макрофитов в градиенте хозяйственно-бытового загрязнения // Морской экологический журнал. 2007. Т. 6. № 2. С. 44–57.

Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 637 с.

Миронов О.Г. Взаимодействие организмов с нефтяными углеводородами. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 127 с.

Мисейко Г.Н. Зооценозы в системе диагностического мониторинга экологического состояния разнотипных водных объектов юга Западной Сибири: дис. ... д-ра биол. наук. Новосибирск, 2004. 266 с.

Михайлов В.Н. Устья рек России и сопредельных стран: прошлое, настоящее и будущее. М.: ГЕОС, 1997. 413 с.

Михеев А.И. Влияние обрастания и низких температур на безопасную эксплуатацию судов // Водный транспорт. 2013. Вып. 3. С. 56–61.

Мордухай-Болтовской Ф.Д. Каталог фауны свободноживущих беспозвоночных Азовского моря // Зоологический журнал. 1960. Т. 39. № 10. С. 1454–1466.

Мордухай-Болтовской Ф.Д. О годовых изменениях в бентосе Таганрогского залива // Зоологический журнал. 1939. Т. 18. № 6. С. 989–1009.

Мысливец В.И. Морфоструктурная основа экосистемы Азовского моря // Комплексный мониторинг среды и биоты Азовского бассейна. Т. VI. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2004. С. 28–43.

Набоженко М.В. Распределение двустворчатых моллюсков рода *Huurnis* Pander in Ménériés, 1832 (*Bivalvia*, *Cardioidea*: *Limnocardiidae*) в Таганрогском заливе // Экология моря. 2005. Т. 69. С. 44–49.

Немировская И.А., Зарецкас С.А. Состав алифатических углеводородов донных осадков Балтийского моря // *Химия моря*. 2001. Т. 41. № 1. С. 53–60.

Овсяный Е.И., Коновалов С.К., Митропольский А.Ю., Котельяниц Е.А. Органический углерод и карбонатность современных донных отложений Керченского пролива // *Геохимия*. 2015. № 12. С. 1120–1131.

Овчинникова С.И., Широкая Т.А., Папкина О.И. Основные тенденции изменения гидрохимических показателей водной системы Кольского залива (2000–2011 годы) // *Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета*. 2012. Т. 15. № 3. С. 544–550.

Остроумов А.А., Совинский В.К. Введение в изучение фауны Понто-Каспийско-Аральского морского бассейна // *Учен. зап. Казан. ун-та. Критика и библиогр.* 1903. Т. 5. № 6. С. 21–35.

Панов Д.Г., Хрусталева Ю.П. Новейшие тектонические движения берегов и дна Азовского моря // *Доклады АН СССР. Геология*. 1966. Т. 166. № 3. С. 688–690.

Патин С.А. Нефть и экология континентального шельфа: в 2 т. 2-е изд., перераб. и дополн. Т. 2: Экологические последствия, мониторинг и регулирование при освоении углеводородных ресурсов шельфа. М.: Изд-во ВНИРО, 2017. 284 с.

Пельтихина Т.С. Ламинариевые водоросли Баренцева моря и их рациональное использование. Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2005.

Передельский Л.В., Коробкин В.И., Приходченко О.Е. Экология. Проспект, 2009. 347 с.

Перетрухина И.В. Гетеротрофный бактериопланктон литорали Кольского залива и его роль в процессах естественного очищения вод от нефтяных углеводородов: автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 2006. 18 с.

Перетрухина И.В., Ильинский В.В., Литвинова М.Ю. Определение скоростей биodeградации нефтяных углеводородов в воде литорали Кольского залива // *Вестник МГТУ: труды Мурманского государственного технического университета*. 2006. Т. 9. № 5. С. 830–835.

Польшин В.В. Гранулометрический и минералогический состав современных донных отложений Азовского моря // *Экосистемные исследования среды и биоты Азовского бассейна*. Ростов н/Д.: Изд-во ЮНЦ РАН, 2012. С. 90–103.

Польшин В.В. Донные отложения позднего голоцена Азовского моря // *Геология, география и экология океана*. Ростов н/Д.: Изд-во ЮНЦ РАН, 2009. С. 269–272.

Польшин В.В. Распределение современных донных отложений в открытой части Азовского моря // Экосистемные исследования Азовского, Черного, Каспийского морей. Т. VIII. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2006. С. 42–49.

Попов Г.И. Плейстоцен Понто-Каспийских проливов. М.: Наука, 1983. 216 с.

Постановление Правительства РФ от 21 августа 2000 г. № 613 «О неотложных мерах по предупреждению и ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов».

Программа для когнитивного анализа и анализа социально-экономических систем регионального уровня. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2018661506 от 07.09.2018.

Протасов В.Ф. Экология, здоровье и охрана окружающей среды в России. М.: Экономика и финансы, 2001. 688 с.

Пуговкин Д.В., Ляймер А.В., Йенсен Дж.Б. Эпифитные бактериальные сообщества водорослей *Fucus vesiculosus* в разных по степени загрязнения нефтепродуктами акваториях Баренцева моря // Доклады РАН. 2016. Т. 471. № 3. С. 371–373.

Раилкин А.И. Колонизация твердых тел бентосными организмами. СПб.: Изд-во СПбГУ, 1998. 428 с.

Раилкин А.И., Усов Н.В., Чикадзе С.З. Различия в сукцессии бентосных сообществ, обусловленные разной пространственной ориентацией субстратов и гидродинамической активностью вод // Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 3. Биология. 2004. № 4. С. 24–30.

Региональная статистика: учебник / под ред. В.М. Рябцева, Г.И. Чудилина. М.: Финансы и статистика, 2006. 624 с.

Роуч П. Вычислительная гидродинамика. М.: Мир, 1980, 284 с.

Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 239 с.

Рыжик И.В. Морфофункциональные особенности промысловых водорослей из разных биотопов Баренцева моря: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Мурманск, 2005.

Самохин А.Ф. Река Дон и ее притоки. Ростов н/Д.: Изд-во РГУ, 1958. 119 с.

Самые страшные стихийные бедствия XXI века // РИА Новости. URL: <https://ria.ru/20171226/1511509320.html?in=t> (дата обращения: 12.10.2021).

Свиточ А.А., Янина Т.А. Новые данные по малакофауне морского плейстоцена Маныча // Доклады Академии наук. 2001. Т. 380. № 4. С. 570–573.

Семенов А.М., Федоренко В.Н., Семенова Е.В. Микроорганизмы на поверхности морских макрофитов в северных морях России и их возможное практическое использование // Биосфера: междисциплинарный научный и прикладной журнал. 2014. Т. 6. № 1. С. 60–76.

Семенова Е.В., Семенов А.М., Иванов М.Н. и др. Роль микроорганизмов-эпифитов фукусовых водорослей в деградации углеводородных загрязнений акваторий северных морей // Экология и промышленность. 2009а. № 3. С. 16–18.

Семенова Е.В., Шлыкова Д.С., Семенов А.М., Иванов М.Н., Шеляков О.В., Нетрусов А.И. Бактерии-эпифиты бурых водорослей в утилизации нефти в экосистемах северных морей // Вестник Московского университета. Сер. 16. Биология. 2009б. № 3. С. 18–22.

Сёмин В.Л., Коваленко Е.П., Савикин А.И. *Aracia* sp. (Polychaeta: Sabellidae) из дельты р. Дон // Российский журнал биологических инвазий. 2014б. № 4. С. 97–101.

Сёмин В.Л., Савикин А.И., Булышева Н.И. Чужеродные виды полихет в дельте Нижнего Дона и восточной части Таганрогского залива // XI съезд Гидробиологического общества при Российской академии наук. 2014а. С. 151–152.

Сёмин В.Л., Савикин А.И., Булышева Н.И., Бирюкова С.В. Влияние колебаний солености на структуру сообществ зообентоса Таганрогского залива // Дельты рек России: закономерности формирования, биоресурсный потенциал, рациональное хозяйствование и прогнозы развития. Мат-лы междунар. молодежной науч. конф. памяти члена-корреспондента РАН Д.Г. Матишова. Ростов н/Д.: Изд-во ЮНЦ РАН, 2018. С. 195–200.

Сёмин В.Л., Сикорский А.В., Коваленко Е.П., Булышева Н.И. Вселение представителей рода *Marenzelleria* Mesnil, 1896 (Polychaeta: Spionidae) в дельту Дона и Таганрогский залив // Российский журнал биологических инвазий. 2016. Т. 9. № 1. С. 109–120.

Скопинцев Б.А. Органическое вещество в природных водах (водный гумус) // Тр. ГОИН. 1950. Вып. 17 (29). 290 с.

Сорокина В.В. Динамика терригенного осадконакопления в Азовском море во второй половине XX века // Азовское море в конце XX – начале XXI века: геоморфология, осадконакопление, пелагические сообщества. Т. X. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2008. С. 32–111.

Специализированные массивы для климатических исследований. URL: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/>. 2020 (дата обращения: 24.03.2021).

Степаньян О.В. Влияние сырой нефти на основные функциональные параметры макроводорослей Баренцева моря // Биология моря. 2008. Т. 34. № 2. С. 144–147.

Степаньян О.В., Воскобойников Г.М. Влияние нефти и нефтепродуктов на морфофункциональные особенности морских макроводорослей // Биология моря. 2006. Т. 32. № 4. С. 241–248.

Столбунова В.Н. Велигеры дрейссены в верхневолжских водохранилищах: многолетняя и сезонная динамика численности, распределение // Поволжский экологический журнал. 2013. № 1. С. 71–80.

Страхов Н.М. Основы теории литогенеза. Т. 1. М., 1962. 212 с.

Студеникина Е.И., Воловик С.П., Толоконникова Л.И., Фроленко Л.Н., Селиванова Е.В. Характеристика донных сообществ Азовского моря в современный период // Основные проблемы рыбного хозяйства и охраны рыбохозяйственных водоёмов Азово-Черноморского бассейна. Сб. науч. тр. (1996–1997 гг.). Ростов н/Д., 1998. С. 67–78.

Фёдоров П.В. Геологическая история Керченского пролива в связи с новыми данными бурения на его дне // Бюл. МОИП. Отд. геол. 1973. Т. 48. № 5. С. 72–82.

Фёдоров П.В. Плейстоцен Понто-Каспия. М., 1978. 166 с.

Фёдоров Ю.А., Доценко И.В. и др. Закономерности распределения S_{org} в донных отложениях российской части Азовского моря // Океанология. 2009. Т. 49. № 2. С. 229–236.

Филиппов Ю.Г. Об одном способе расчета морских течений // Тр. ГОИН. 1970. Вып. 103. С. 87–94.

Фроленко Л.Н. Полихеты Азовского моря и особенности их развития // Основные проблемы рыбного хозяйства и охраны рыбохозяйственных водоемов Азово-Черноморского бассейна: сб. научных тр. АзНИИРХ (1998–1999 гг.) / под ред. Э.В. Макарова. Ростов н/Д.: БКИ, 2000. С. 62–65.

Хрусталеv Ю.П. Закономерности осадконакопления во внутриконтинентальных морях аридной зоны. Л.: Наука, 1989. 261 с.

Хрусталеv Ю.П. Основные проблемы геохимии седиментогенеза в Азовском море. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1999. 247 с.

Хрусталеv Ю.П., Ивлиева О.В. Проблемы антропогенной морской седиментологии (на примере Азовского моря). Ростов н/Д.: Гефест, 1999. 196 с.

Хрусталеv Ю.П., Щербаков Д.А. Позднечетвертичные отложения Азовского моря и условия их накопления. Ростов н/Д., 1974. 148 с.

Чернявский В.И. Материалы для сравнительной зоогеографии Пон-та // Тр. I Съезда русских естествоиспытателей и врачей. Отд. зоол. 1868. С. 19–136.

Чикин А. Л., Клещенков А. В., Чикина Л. Г. Численное исследование влияния расхода воды на уровенный режим в устьевой области Дона // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35. № 4. С. 355–366. DOI:10.22449/0233-7584-2019-4-355-366

Чикин А.Л., Чикина Л.Г. Двухслойная модель переноса вещества в водоемах с большой неоднородностью глубин // Океанология. 2020. Т. 60. № 4. С. 507–514. DOI: 10.31857/S0030157420040048

Чикина Л.Г., Чикин А.Л. Численное исследование гидродинамики Приплотинного плеса Цимлянского водохранилища // Современные информационные технологии: тенденции и перспективы развития. Мат-лы XXV науч. конф. (Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, 17–18 мая 2018 г.). Ростов н/Д., 2018. С. 177–181.

Шахматова О.А., Мильчакова Н.А. Активность каталазы черноморских видов *Cystoseira* С. Ag. в различных экологических условиях // Альгология. 2009. Т. 19. № 1. С. 34–46.

Шкабара Н.А. Эколого-технологическое изучение покрытия барьерного типа для защиты от коррозии и морского обрастания нефтегазопроводов, плавучих средств и портовых сооружений (на примере Геленджикской бухты): автореф. дис. ... канд. техн. наук. Краснодар, 2015. 113 с.

Шнюков Е.Ф., Орловский Г.Н., Усенко В.П., Григорьев А.В., Гордиевич В.А. Геология Азовского моря. Киев: Наукова думка, 1974. 248 с.

Янина Т.А. Дидакны Понто-Каспия. Смоленск: Маджента, 2005. 300 с.
Яновский Э.Г. Рыбы Азовского моря. Бердянск, 2001. 89 с.

Atlas R.M. Microorganisms and Petroleum Pollutants // BioScience, 1978. Vol. 28. No. 6. P. 387–391.

Atlas R.M., Horowitz A., Busdosh M. Prudhoe crude oil in Arctic marine ice, water and sediment ecosystems: Degradation and interaction with microbial and benthic communities // J. Fish. Res. Bd. Canada. 1978. Vol. 35. P. 585–590.

Bick A. et al. Description of a new species of Sabellidae (Polychaeta, Annelida) from fresh and brackish waters in Europe, with some remarks on the branchial crown of Laonome // Zootaxa. 2018. Vol. 4483. № 2. P. 349–364.

Cantrell A., McGarvey D.J., Truscott T.G., Rancan F., Boëhm F. Singlet oxygen quenching by dietary carotenoids in a model membrane environment // Arch. Biochem. Biophys. 2003. Vol. 412. P. 47–54.

Climatic Atlas of the Sea of Azov 2006. World Data Center for Oceanography // Silver Spring, International Ocean Atlas and Information Series. 2006. Vol. 10. 106 p.

Collén J., Davison I. Reactive oxygen metabolism in intertidal *Fucus* spp. (Phaeophyceae) // J. Appl. Phycol. A. 1999. Vol. 35. P. 62–69.

Collén J., Davison I. Stress tolerance and reactive oxygen metabolism in the intertidal red seaweeds *Mastocarpus stellatus* and *Hondrus crispus* // Plant. Cell. Environ. 2001. Vol. 22. P. 1143–1151.

Dring M.J. Stress resistance and disease resistance in seaweeds: the role of reactive oxygen metabolism // Adv. Bot. Res. 2006. No. 43. P. 175–207.

Flather R.A., Heaps N.S. Tidal Computations for Morecamble Bay // Geophys. J. R. Astron. Soc. 1975. No. 42. P. 489–518.

Giannopolitis C.N., Ries S.K. Superoxide dismutase I. Occurrence in higher plants // Plant Physiol. 1972. Vol. 59. P. 309–314.

Gorelova G.V., Pankratova N.D. Scientific Foresight and Cognitive Modeling of Socio-Economic Systems // IFAC-PapersOnLine. Elsevier, 2018. Vol. 51. No. 30. P. 145–149.

Goryachkin Yu.N., Ivanov V.A., Repetin L.N., and Khmara T.V. Seiches in the Sebastopol Bay // Nauk Pratsi UkrNDGMz. 2002. No. 250. P. 342–353.

Grande H., Reis M., Jacobucci G. BuzáSmall-scale experimental contamination with diesel oil does not affect the recolonization of *Sargassum* (Fuciales) fronds by vagile macrofauna // Zoologia (Curitiba). 2012. Vol. 29. No. 2. P. 135–143. URL: <http://dx.doi.org/10.1590/S1984-46702012000200006>.

Greenberg D.A. A Numerical Model Investigation of Tidal Phenomena in the Bay of Fundy and Gulf of Maine // Mar. Geod. 1979. Vol. 2 (2). P. 161–187.

Halffter G. A strategy for measuring landscape biodiversity // Biology International. 1998. No. 36. P. 3–17.

Heaps N.S. On the Numerical Solutions for Tides and Storm Surges // Met. Soc. Roy. Sci. (Liege, Belgium). 1972. Vol. 2. P. 143–180.

Henry R.F., Heaps N.S. Storm Surges in the Southern Beafort Sea // J. Fish. Res. Board Can. 1976. No. 33. P. 2362–2378.

URL: <http://www.emercit.com/map/>

Ivanov G.S. Fluctuations in the Sea of Azov Level Determined by Hydrometeorological Factors // Dokl. GOIN. 1945. No. 56. P. 1–11.

Ivanov V.A., Manilyuk Yu.V., Cherkesov L.V. Seiches in the Sea of Azov // Meteorol. Hidrol. 1994. No. 6. P. 105–110.

Kaminskii S.T., Fedoseev V.B. Effect of Downward urrents on Seiche Formation in the Black Sea // Tr. MGFI. 1975. No. 1. P. 210–220.

Kokowicz Pilatti F. et al. In vitro exposure of *Ulva lactuca* Linnaeus (Chlorophyta) to gasoline e Biochemical and morphological alterations // Chemosphere. 2016. Vol. 156. P. 428–437.

Lewis M., Pryor R. Toxicities of oils, dispersants and dispersed oils to algae and aquatic plants: Review and database value to resource sustainability // Environmental Pollution. 2013. Vol. 180. P. 345–367.

Manilyuk Yu.V., Cherkesov L.V. Mathematical Model Based on the Finite Element Technique is Applied to Study Seiche Oscillations in the Sea of Azov // Morsk. Gidrof. Zhurn. 1994. No. 5. P. 3–8.

Manilyuk Yu.V., Cherkesov L.V. Simulation of Seiche Oscillations in the Sea of Azov, Using the Finite Element Technique // Phys. Oceanogr. 1995. Vol. 6 (5). P. 325–329.

Matishov G.G. Climatic Atlas of Sea of Azov 2008 / NOAA ATLAS NESDIS 65. Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office, 2008. 148 p.

Matishov G.G., Inzhebeikin Yu.I. Numerical Study of the Azov Sea Level Seiche Oscillations // Okeanologiya. 2009. Vol. 49. No. 4. P. 485–493.

Melnik E.V., Orda-Zhigulina M.V., Orda-Zhigulina D.V., Ivanov D.Y., Rodina A.A. Fog computing in new approach for monitoring of hazardous phenomena // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1333. No. 7. P. 072016.

Oberbeckman S., Gerdtz G., Wichels A., Laatsch H., Schumann G. Diversity of epiphytic marine bacteria associated with fronds of the brown algae *Laminaria* // Annual Conference of the Association for General and Applied Microbiology, 1–4 April, Osnabrück, 2007, Germany.

Okamoto K.O., Pinto E., Latorre L.R., Bechara E.J.H., Colepicolo P. Antioxidant modulation in response to metal-induced oxidative stress in algal chloroplasts // Arch. Environ. Contam. Toxicol. 2001. No. 40. P. 18–24.

Orda-Zhigulina M.V., Melnik E.V., Ivanov D.Y., Rodina A.A., Orda-Zhigulina D.V. Combined Method of Monitoring and Predicting of Hazardous Phenomena // Computer Science On-line Conference. Springer, Cham, 2019. P. 55–61.

Pilatti F.K., Ramlov F., Schmidt E.C., Kreusch M. et al. In vitro exposure of *Ulva lactuca* Linnaeus (Chlorophyta) to gasoline. Biochemical and morphological alterations // Chemosphere. 2016. No. 156. P. 428–437.

Platzman G.T. Two-Dimensional Free Oscillation in Nature Basin // J. Phys. Oceanogr. 1972. Vol. 2 (2). P. 117–138.

Pugovkin D.V., Liaimer A., Jensen J.B. Epiphytic bacterial communities of the alga *Fucus vesiculosus* in oil-contaminated water areas of the Barents Sea // Doklady Biological Science. 2016. Vol. 471 (1). C. 269–271.

Queval G., Hager J., Gakiere B., Noctor G. Why are literature data for H_2O_2 so variable? A discussion of potential difficulties in the quantitative assay of leaf extracts // J. of Experimental Botany. 2008. Vol. 59. P. 135–146.

Rajendran M., Manisankar P., Gandhidasan R., Murugesan R. Free radicals scavenging efficiency of a few naturally occurring flavonoids: a comparative study // J. Agric. Food Chem. 2004. Vol. 52. P. 7389–7394.

Ramadass K., Megharaj M., Venkateswarlu K., Naidu R. Toxicity of diesel water accommodated fraction toward microalgae, *Pseudokirchneriella subcapitata* and *Chlorella* sp. MM3 // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2017. Vol. 142. P. 538–543. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.04.052>.

Ramming H.G. and Kowalik Z. Numerical Modelling of Marine Hydrodynamics. Application To Dynamic Physical Processes // Elsevier Oceanography Ser. 1980. Vol. 26.

Rosenberg G. Ecological growth strategies in the seaweeds *Gracilaria folifera* (Rhodophyceae) and *Ulva* sp. (Chlorophyceae): PhD Thesis. Yale University. New Haven. Connecticut, 1981. 163 p.

Ryzhik I., Pugovkin D., Makarov M., Basova L., Voskoboynikov G., Roleda M.Y. Tolerance of exposed to diesel water-accommodated fraction (WAF) and degradation of hydrocarbons by the associated bacteria // Environmental Pollution. 2019. Vol. 254. P. 113072.

Ryzhik I.V. Seasonal variations in the metabolic activity of cells of *Fucus vesiculosus* Linnaeus, 1753 (Phaeophyta: Fucales) from the Barents Sea // Russian Journal of Marine Biology. 2016. Vol. 42. No. 5. P. 433–436. (Scopus, IF-0,25, HI-19, Q-4). DOI:10.1134/S1063074016050102

Scheer B.T. The development of marine fouling communities // Biological Bulletin. 1945. Vol. 89. No. 2. P. 103–121.

Seely G.R., Duncan M.J., Vidaver W.E. Preparation and analytical extraction of pigments from brown algae with dimethyl sulfoxide // Mar. Biol. 1972. Vol. 12. P. 184–188.

Shakhmatova O., Ryzhik I. Seasonal Dynamics of Catalase Activity in *Cystoseira crinita* (Black Sea) and *Fucus vesiculosus* (Barents Sea) // Ecological Chemistry and Engineering S. 2020. Vol. 27. Is. 4. P. 643–650.

Shiba T., Taga N. Heterotrophic bacteria attached to seaweeds // Journal of Experimental Marine Biology and Ecology. 1980. Vol. 47. P. 251–258.

Shwab D.J., Rao D.B. Two-Dimensional Normal Modes in Arbitrary Enclosed Basins on Rotating Earth: Application to Lakes Ontario and Superior // Philos. Trans. R. Soc. 1976. Vol. 281 A. P. 63–98.

Sielecki A. An Energy-Conserving Difference Scheme for the Storm Surge Equations // *Mon. Weather. Rev.* 1968. No. 96. P. 150–156.

Sikorski A.V., Bick A. Revision of *Marenzelleria* Mesnil, 1896 (Spionidae, Polychaeta) // *Sarsia*. Taylor & Francis. 2004. Vol. 89. No. 4. P. 253–275.

Syomin V., Sikorski A., Bastrop R., Köhler N., Stradomsky B., Fomina E., Matishov D. The invasion of the genus *Marenzelleria* (Polychaeta: Spionidae) into the Don River mouth and the Taganrog Bay: morphological and genetic study // *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*. 2017. Vol. 97. No. 5. P. 975–984.

Tesakov A.S., Dodonov A.E., Titov V.V., Trubikhin V.M. Plio-Pleistocene geological record and small mammal faunas, eastern shore of the Azov Sea, Southern European Russia // *Quaternary International*. 2007. Vol. 160. P. 57–69. DOI: 10.1016/j.quaint.2006.09.009

Thorade H. Seiches im Schwarzen und Asowschen Meer // *Ann. Hydrogr. Marit. Meteorol.* 1925. Vol. 53 (10). P. 234–241.

Tornblom E., Sondergaard M. Seasonal dynamics of bacterial biomass and production on eelgrass *Zostera marina* leaves // *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 1999. Vol. 179. P. 231–240.

Torres M.A., Barros M.P., Campos S.C.G., Pinto E., Rajamani S., Sayre R.T., Colepicolo P. Biochemical biomarkers in algae and marine pollution: A review // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2008. Vol. 71. P. 1–15.

Vardi A., Berman-Frank I., Rozenberg T., Hadas O., Kaplan A., Levine A. Programmed cell death of the dinoflagellate (*Peridinium gatunense*) is mediated by CO₂ limitation and oxidative stress // *Curr. Biol.* 1999. No. 9. P. 1061–1064.

Wolfe M.F., Schwartz G.J.B., Singaram S., Mielbrecht E.E., Tjeerdema R.S., Sowby M.L. Influence of dispersants on the bioavailability of naphthalene from the water-accommodated fraction crude oil to the golden-brown algae (*Isochrysis galbana*) // *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 1998. No. 35. P. 274–280.

Wrabel M.L., Peckol P. Effects of bioremediation on toxicity and chemical composition of No. 2 fuel oil: growth responses of the brown alga *Fucus vesiculosus* // *Mar. Pollution Bullet.* 2000. Vol. 40. Iss. 2. P. 135–139.

Wubber C., Krauss W. The Two-Dimensional Seiches of the Baltic Sea // *Oceanol. Acta*. 1979. Vol. 2 (4). P. 748–755.

Научное издание

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ МОНИТОРИНГА
И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОПАСНЫХ ЯВЛЕНИЙ
В ЗОНЕ СТРАТЕГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ
В АКВАТОРИИ РОССИЙСКИХ МОРЕЙ**

Редакторы:

А.С. Бабаева, А.А. Яковлева

Дизайн обложки

А.В. Коржов

Верстка:

Л.В. Безбородова, Я.Ю. Яковлева

Издательство ЮНЦ РАН

344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41

Тел. (863) 250-98-21

Подписано в печать 14.12.2021.
Бумага мелованная. Формат 72 × 104/16. Тираж 300 экз.
Усл. п. л. 19,18. Заказ № 16/21. Гарнитура MinionPro.



Подготовлено и отпечатано DSMGroup (ИП Лункина Н.В. Св-во № 002418081).
344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Седова, 9, тел. 263-26-38,
e-mail: dsmgroup@mail.ru