

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ОКЕАНОЛОГИИ ИМ.П.П. ШИРШОВА  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

УДК 504.064.36:574

№ госрегистрации 114112770059

Инв. №

УТВЕРЖДАЮ

Зам. директора ИО РАН

А.В. Соков

2014 г.



ОТЧЕТ

О ПРИКЛАДНЫХ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Исследование технологии мониторинга и прогнозирования экологического  
состояния водной среды морского шельфа

по теме:  
ВЫБОР НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ  
(промежуточный)

Шифр «2014-14-576-0052-116»

Научный руководитель  
доктор физ.-мат. наук

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'А.Г. Зацепин'.

А.Г. Зацепин

Москва 2014

## РЕФЕРАТ

Отчет 238 с., 35 рис., 10 табл., 91 источник, 7 прил.

### ПОДСПУТНИКОВЫЙ ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ МОРСКИХ АКВАТОРИЙ, АВТОМАТИЗАЦИИ ИЗМЕРЕНИЙ И ОПЕРАТИВНОЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ, ЧЕРНОЕ МОРЕ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ПОДСПУТНИКОВЫЙ ПОЛИГОН, СПУТНИКОВАЯ ИНФОРМАЦИЯ, ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МОРСКОЙ ПРИБРЕЖНОЙ АКВАТОРИИ

Объектом научно-исследовательской работы в рамках проекта являются прибрежные морские экосистемы, способы и методы их исследований, оценки и прогноза их состояния на основе сочетания трех подходов, включающих в себя долговременные натурные наблюдения, проводящиеся с использованием новейших технических методов, анализа спутниковой информации и эко-гидродинамического численного моделирования.

Цель работы: создание научно-технического задела в области технологии мониторинга и краткосрочного прогнозирования экологического состояния акватории морского шельфа Черного моря на основе спутниковых и контактных измерений и высокоразрешающей численной модели циркуляции моря.

В процессе работы на этапе 1 выполнен аналитический обзор современной научно-технической, нормативной, методической литературы, затрагивающей научно-техническую проблему, исследуемую в рамках ПНИ. Проведены патентные исследования. Обоснован выбор направления исследований. Разработан регионально адаптированный алгоритм восстановления концентрации хлорофилла «а» в морской воде по спутниковым данным. Разработана методика двухканального восстановления температуры морской поверхности Черного моря по данным спутникового сканера TIRS. Разработана численная модель с улучшенным разрешением у побережья Геленджика в районе полигона ИОРАН. Разработаны Программы и методики натурных комплексных исследований экологических параметров и натурных измерений с помощью автономных измерительных комплексов в шельфово-склоновой зоне Черного моря в районе подспутникового полигона. Проведены натурные комплексные исследования экологических параметров и натурные измерения с помощью автономных измерительных комплексов на подспутниковом полигоне в северо-восточной части Черного моря в соответствии с программой и методикой исследований.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	8
1. Аналитический обзор современной научно-технической, нормативной, методической литературы, затрагивающей научно-техническую проблему, исследуемую в рамках ПНИ	13
1.1 Особенности организации подспутниковых полигонов.....	13
1.2 Технологии и методы численного моделирования динамики вод океана и его прибрежных зон.....	32
2 Проведение патентных исследований .....	50
3 Обоснование выбора направления исследований .....	53
4 Разработка регионально адаптированного алгоритма восстановления концентрации хлорофилла «а».....	58
5 Разработка методики двухканального восстановления температуры морской поверхности Черного моря по данным спутникового сканера TIRS .....	66
5.1 Спутниковые данные о температуре поверхности океана .....	66
5.2 Обоснование двухспектрального метода восстановления ТПО.....	68
6 Разработка численной модели динамики вод Черного моря с улучшенным разрешением у побережья Геленджика в районе полигона ИО РАН .....	80
6.1 Описание модели.....	80
6.2 Постановка задачи.....	80
6.3 Численный алгоритм.....	84
6.4 Оценка загрязнения моря с помощью метода сопряжённых уравнений .....	85
6.5 Модельная область и используемые данные .....	87
7 Разработка программы и методики натуральных комплексных исследований экологических параметров на подспутниковом полигоне в северо-восточной части Черного моря.....	89
7.1 Концептуальная основа программы .....	89
7.2 Исходная информация для разработки программы .....	90
7.3 Цель и основные задачи программы.....	94
7.4 Характеристика района исследований .....	95
7.5 Разработка методики натуральных комплексных исследований экологических параметров на подспутниковом полигоне .....	100
7.6 Формирование состава, видов и объемов работ на подспутниковом полигоне в ходе натуральных комплексных экологических исследований .....	104
7.7 Особенности проведения натуральных экологических исследований в шельфово-склоновой зоне Черного моря .....	105
7.8 Требования по технике безопасности при выполнении натуральных исследований .....	106
8 Проведение натуральных комплексных исследований экологических параметров на подспутниковом полигоне в северо-восточной части Черного моря в соответствии с программой и методикой исследований .....	108
8.1 Общие сведения о выполненных исследованиях .....	108
8.2 Результаты натуральных комплексных исследований экологических параметров на подспутниковом полигоне в северо-восточной части Черного моря.....	109
9 Приобретение акустического размыкателя для заякоренных автономных станций (работа индустриального партнера) .....	121

10 Разработка программы и методики натуральных измерений с помощью автономных измерительных комплексов на подспутниковом полигоне в шельфово-склоновой зоне Черного моря.....	124
10.1 Концептуальная основа программы .....	124
10.2 Исходная информация для разработки программы .....	125
10.3 Цель и основные задачи программы.....	128
10.4 Характеристика района исследований .....	130
10.5 Формирование состава, видов и объемов работ на подспутниковом полигоне в ходе натуральных измерений с помощью автономных измерительных комплексов.....	138
11 Проведение натуральных измерений с помощью автономных измерительных комплексов на подспутниковом полигоне в шельфово-склоновой зоне Черного моря.....	142
11.1 Общие сведения о натуральных измерениях, выполненных с помощью гидрофизических автономных станций .....	142
11.2 Сбор, обработка и представление метеорологических данных .....	145
11.3 Результаты натуральных измерений с помощью автономных измерительных комплексов на подспутниковом полигоне .....	147
12 Участие в мероприятиях, направленных на освещение и популяризацию промежуточных результатов ПНИ .....	153
Заключение.....	155
Список использованных источников.....	158
Приложение А. Отчет о патентных исследованиях .....	165
Приложение Б. Региональный алгоритм восстановления концентрации хлорофилла «а», адаптированный для Черного моря .....	181
Приложение В. Методика двухканального восстановления температуры морской поверхности Черного моря по данным спутникового сканера TIRS .....	184
Приложение Г. Описание численной модели динамики вод Черного моря с улучшенным разрешением у побережья Геленджика в районе полигона ИО РАН .....	190
Приложение Д. Программа и методика натуральных комплексных исследований экологических параметров на подспутниковом полигоне в северо-восточной части Черного моря .....	196
Приложение Е. Программа и методика натуральных измерений с помощью автономных измерительных комплексов на подспутниковом полигоне в шельфово-склоновой зоне Черного моря .....	216
Приложение Ж. Отчет об участии в мероприятиях, направленных на освещение и популяризацию промежуточных результатов ПНИ .....	236

## НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящем отчете о НИР использованы ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 4202-75 Реактивы. Калий йодноватоокислый. Технические условия.

ГОСТ 10652-73 Реактивы. Соль динатриевая этилендиамин-N,N,N',N'- тетрауксусной кислоты 2-водная (трилон Б). Технические условия.

ГОСТ 51592-2000 Общие требования к отбору проб.ГОСТ 8.135-74 рН-метрия. Стандарт-титры для приготовления образцовых буферных растворов 2-го разряда. Технические условия.

ГОСТ 17.1.5.04-81 Охрана природы. Гидросфера. Приборы и устройства для отбора, первичной обработки и хранения проб природных вод. Общие технические условия.

ГОСТ 17.1.5.05-85 "Общие требования к отбору проб поверхностных и морских вод"

ГСО 7791-2000 Стандартный образец Фосфат-ион, 0,5г/л

ГСО 7862-2000 Стандартный образец Азот нитритный, 1 мг/мл.

ГСО 7864-2000 Стандартный образец Азот аммонийный, 1 мг/мл

ГСО 8212-2002 Стандартный образец Кремний-ион, 1 мг/мл.

ГСО 8403-2003 Стандартный образец Гидрокарбонат-ион 1г/л, фон-вода.

ПНД Ф 14.1:2:3-95 Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовой концентрации нитрит-ионов в природных и сточных водах.

ПНД Ф 14.1:2:3:4.121-97 Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений рН в водах потенциометрическим методом.

ПНД Ф 14.1:2.112-97 Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовой концентрации фосфат-ионов в пробах природных и очищенных сточных вод фотометрическим методом восстановлением аскорбиновой кислотой.

РД 52.10.243-92 Руководство по химическому анализу морских вод.

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящем отчете о НИР применяют следующие термины с соответствующими определениями:

Фронтальная зона – зона раздела водных масс, резко различающихся по гидрофизическим параметрам (температура, соленость, плотность).

Разрез (океанологический) – ряд океанологических станций, расположенных по определенному направлению, преимущественно по прямому курсу судна.

Валидация – процесс определения точности, воспроизводимости, чувствительности, устойчивости и других метрологических характеристик.

Речной плюм – линзовидное тело речной воды на поверхности вод принимающего бассейна (озера, моря) напротив устья реки, обособленное вследствие разницы солёности, температуры, количества взвешенного вещества.

Термохалинная структура – структура водной толщи по показателям температуры и солёности.

Реанализ – ретроспективный анализ гидрометеорологических данных за предыдущие десятилетия с помощью математических моделей с целью анализа и прогноза.

В настоящем отчете о НИР применяют следующие обозначения и сокращения:

CTD-зонд – приборный комплекс с датчиками проводимости (Conductivity), температуры (Temperature) и глубины (Depth), являющийся стандартным океанологическим средством измерения.

СВЧ – сверх высокие частоты.

GPS – система глобального позиционирования.

ADCP – профилограф скорости течений (Acoustical Doppler Current Profiler).

ДЗЗ – дистанционное зондирование Земли

РЛС БО – радиолокационные станции бокового обзора

РСА – радиолокаторы с синтезированной апертурой

КПП – контрольно-калибровочный полигон

КА – космический аппарат

ИСЗ – искусственный спутник Земли

ОЧТ – основное черноморское течение

## ВВЕДЕНИЕ

Задача мониторинга и прогнозирования состояния прибрежных морских акваторий, включая контроль состояния зоны прилегающего морского шельфа является весьма актуальной среди других геоэкономических и технологических задач. В этом контексте велика роль спутниковых и подспутниковых наблюдений в задачах построения систем мониторинга, анализа и прогнозирования состояния водной среды.

Области морских акваторий, относимые к зоне шельфа и непосредственно примыкающие к морским побережьям, представляют наибольший интерес для хозяйственного использования в интересах развития потенциала приморских территорий, включая как экономические составляющие различных видов прибрежной деятельности, так и использование их рекреационного потенциала. В зонах прибрежного шельфа сосредотачивается наибольшая плотность местного и магистрального судоходства, а также, как правило, именно в области шельфа ведется морская разработка углеводородного сырья, что приводит к существенному увеличению экологической нагрузки и опасности загрязнения морских акваторий и возникновению экологических проблем, а иногда и локальных экологических катастроф. Область шельфа является перманентной зоной взаимодействия и перемешивания морских и речных вод, приносящих в море значительные массы взвешенных веществ, как естественного происхождения, так и включая различные отходы хозяйственной деятельности человека на очень значительных территориях, по площади превосходящих в несколько раз площадь тех морских акваторий, которые принимают и усваивают весь входящий речной сток и взвеси, выдерживая при этом значительный экологический стресс. Прибрежные и шельфовые акватории являются, также, зонами наибольшего биоразнообразия и максимальной биопродуктивности, что повышает их хозяйственное значение, а также представляет собой самостоятельную ценность, не сводимую к экономическим категориям. Одновременно приморская береговая полоса и прибрежные акватории моря являются традиционной зоной высокой рекреационной значимости и имеют, в зависимости от ландшафтных особенностей, высокий туристско-курортный потенциал, который оказывается подверженным различным экологическим угрозам. Интенсивная портовая и промышленная деятельность во многих приморских городах также приводит к усилению антропогенной экологической нагрузки на прибрежную зону и шельфовые акватории.

Способность морских вод к самоочищению в значительной мере позволяет справляться с большинством видов экологических нагрузок и угроз. Однако способность морских экосистем к борьбе с антропогенным стрессом и усиливающимся воздействием на

прибрежные и шельфовые морские акватории не является бесконечной, ее не стоит переоценивать. В течение последних нескольких десятилетий произошла значительная утрата биоразнообразия и пищевой биопродуктивности многих морей, окружающих территорию Российской Федерации – Черного, Каспийского, Баренцева, Белого и др. Происходит частичная деградация экосистем в прибрежной и шельфовой зонах морей, ценные виды биоресурсов замещаются бесполезными либо вредными с точки зрения хозяйственной деятельности либо рекреационной ценности. Такие изменения важно своевременно выявлять и отслеживать их динамику в интересах контроля ситуации и разработки рекомендаций по оптимизации хозяйственной деятельности в прибрежной и шельфовой зонах, а также для прогнозирования дальнейшего развития и динамики ситуации в области морского шельфа и прибрежных акваторий.

Важнейшим качеством наблюдательных систем, предназначенных для мониторинга и исследования гидрологической, гидрохимической, гидробиологической и экологической ситуации в прибрежной и шельфовой зонах, является постоянство и регулярность наблюдений в течение длительного периода времени. Это не отменяет важности других параметров мониторинга и изучения – широта охвата территории (акваторий моря), глубина и полнота проводимых измерений, своевременная обработка измерительных данных, их оперативная публикация и обеспечение широкой доступности и др. Каждый вид наблюдений имеет свое экономическое измерение – цена вопроса всегда ненулевая, поэтому именно экономическая сторона дела почти всегда является определяющим фактором, лимитирующим количество и качество натуральных наблюдений за параметрами морской среды. Особенно тесно экономические факторы влияют на проведение судовых измерений – как наиболее затратных в части экономики. В меньшей, но тоже в значительной степени экономические факторы лимитируют проведение измерений с помощью автоматизированных комплексов – буев, заякоренных и донных станций, береговых средств наблюдения и т.п.

Прорывным направлением в морских исследованиях является широкое и все расширяющееся использование спутниковых средств наблюдений. Неоспоримые достоинства спутниковых методов наблюдения – высокая периодичность и стабильность, широкая полоса обзора (для оптических и инфракрасных сканеров) – делают спутниковые данные незаменимыми, а порой и единственными видами данных о параметрах морских акваторий. К числу измеряемых спутниковыми методами параметров относятся: температура морской поверхности, цветность (соответственно - и первичная биопродуктивность) морских акваторий, локальный уровень (возвышение) водной поверхности, что позволяет строить карты приповерхностных течений, направление и



скорость приводного ветра, богатейшие по своей информативности детальные картины шероховатости морской поверхности, в стадии экспериментальной эксплуатации - построение карт солёности по данным многоканальной СВЧ-радиометрии. Использование спутниковых методов наблюдений морских акваторий занимает все большее и, временами, решающее место среди различных видов и средств океанологических наблюдений. Необходимо так же отметить широкое использование спутниковой связи и навигации, без которых уже невозможно представить сами процессы современных океанологических наблюдений, их географической привязки, оперативной доставки информации.

Однако каждый вид спутниковых средств наблюдения имеет свои ограничения и особенности. Наибольшее влияние на результативность космических наблюдений оказывает состояние атмосферы – в первую очередь наличие или отсутствие облачности, а также изменяющаяся в широких пределах оптическая толщина атмосферы в разных диапазонах длин волн, зависящая от текущей концентрации и видового состава аэрозолей. В результате этого спутниковые данные о температуре морской поверхности и концентрации хлорофилла в приповерхностных водах - являются не всегда достоверными, возможны значительные потери и пропуски данных. Кроме того, алгоритм и параметры восстановления концентрации хлорофилла по колориметрическим наблюдениям существенно зависят от района наблюдений, т.е. требуют дополнительной валидации, особенно желательной в прибрежно-шельфовой зоне, характеризующейся высокой вариативностью параметров морской среды. Активные средства спутникового зондирования – скаттерометры и альтиметры – имеют ограничения на работу и качество получаемых данных в прибрежных зонах шириной до нескольких десятков километров. Т.е. зона наибольшего интереса – область прибрежного шельфа – оказывается одновременно зоной уменьшенной достоверности для некоторых видов спутниковых данных. Радиолокационные изображения высокого разрешения не всегда поддаются однозначной интерпретации, а их данные, хотя и являются всепогодными, в большой степени зависят от скорости приводного ветра, способного изменяться в широких пределах, а также многих других параметров, в результате чего для их надёжной интерпретации требуется, как минимум, понимание ветровой обстановки, осадков и т.д. Все виды дистанционных океанологических данных касаются тех или иных характеристик только самой морской поверхности (либо достаточно тонкого слоя приповерхностных вод - единицы метров в оптическом диапазоне). Интерпретация и эффективное использование спутниковой информации невозможно без привлечения измерений *in situ* (в природных условиях), а также всех накопленных океанологической наукой знаний о явлениях и процессах,

происходящих как в приповерхностных слоях морей и океанов, так и на глубинных горизонтах.

Именно совместное использование спутниковых и контактных подспутниковых данных способно обеспечить эффективное использование данных спутникового дистанционного зондирования в интересах решения океанологических и связанных с ними народнохозяйственных задач, в том числе в круге задач и проблем мониторинга, освоения и экологии морского шельфа.

Основанием для проведения ПНИ, выполняемого в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы», является Соглашение № 14.604.21.0044 о предоставлении субсидии от 23 июня 2014 г.

Целью ПНИ является создание научно-технического задела в области технологии мониторинга и краткосрочного прогнозирования экологического состояния акватории морского шельфа Черного моря на основе спутниковых и контактных измерений и высокоразрешающей численной модели циркуляции моря.

Цель 1-го этапа выполнения ПНИ – выбор и обоснование направления исследований.

Задачи 1-го этапа:

- 1) Аналитический обзор современной научно-технической, нормативной, методической литературы, затрагивающей научно-техническую проблему, исследуемую в рамках ПНИ.
- 2) Проведение патентных исследований.
- 3) Обоснование выбора направления исследований
- 4) Разработка регионально адаптированного алгоритма восстановления концентрации хлорофилла «а».
- 5) Разработка методики двухканального восстановления температуры морской поверхности Черного моря по данным спутникового сканера TIRS
- 6) Разработка численной модели динамики вод Черного моря с улучшенным разрешением у побережья Геленджика в районе полигона ИОРАН
- 7) Разработка программы и методики натурных комплексных исследований экологических параметров на подспутниковом полигоне в северо-восточной части Черного моря
- 8) Проведение натурных комплексных исследований экологических параметров на подспутниковом полигоне в северо-восточной части Черного моря в соответствии с программой и методикой исследований

9) Разработка программы и методики натурных измерений с помощью автономных измерительных комплексов на подспутниковом полигоне в шельфово-склоновой зоне Черного моря

10) Проведение натурных измерений с помощью автономных измерительных комплексов на подспутниковом полигоне в шельфово-склоновой зоне Черного моря

Решение задач 1-го этапа обеспечивает методическую и информационную основу для выполнения общей цели ПНИ.

# 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР СОВРЕМЕННОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ, НОРМАТИВНОЙ, МЕТОДИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, ЗАТРАГИВАЮЩЕЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКУЮ ПРОБЛЕМУ, ИССЛЕДУЕМУЮ В РАМКАХ ПНИ

## 1.1 Особенности организации подспутниковых полигонов

### 1.1.1 Краткое описание наземных подспутниковых полигонов на территории СНГ. Основные требования, предъявляемые к полигонам

Понимание взаимодополняющего характера и возможностей средств и методов спутниковых и подспутниковых наблюдений возникло одновременно с появлением самих спутников и дистанционных методов зондирования Земли и морских покровов. Каждый вид спутниковых данных и конкретный тип зондирующей аппаратуры прежде всего нуждался в подспутниковой калибровке. Результаты зондирования выделенных полигонов с заданными характеристиками: альбедо, типами почв и грунтов, видами и характеристиками растительности и т.д. – использовались для уточнения параметров измерительной аппаратуры, калибровки датчиков, а главное - интерпретации результатов зондирования и использования дистанционных данных, полученных вдоль трасс пролета спутников за пределами выделенных полигонов.

Совершенно конкретных стандартных требований к подспутниковым полигонам, видимо, не существует – для каждого типа аппаратуры (чаще всего это оптические многоканальные сканеры, а также пассивные и активные СВЧ-комплексы – радиометры или радиолокационные станции бокового обзора (РЛС БО) или радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА)) требуются специфические особенности построения полигонов. Универсальными требованиями к подспутниковым полигонам являются, пожалуй, их достаточная протяженность (десятки км) при наличии участков территории достаточной однородности или плавной изменчивости контролируемых параметров (для суши, например – типов почвогрунтов, типов естественной растительности, сельскохозяйственных посадок и т.п.), а также хорошая изученность параметров и особенностей полигона наземными средствами наблюдений, в т.ч. их сезонной изменчивости, например, индексов вегетации, влажности почв, толщины снежных покровов и т.д. Зачастую полезным является использование искусственных объектов (зданий, сооружений), расположенных на полигоне, в качестве реперов для точной привязки и калибровки разрешающей способности высокоточных спутниковых датчиков. Для калибровки РЛС БО и РСА обычно устанавливаются наборы уголковых отражателей, а для работ с оптическими приборами – наборы геометрических или цветовых фигур.

В источнике [1] названы следующие основные задачи полигонного обслуживания, выполняемые наземными подспутниковыми полигонами:

- точная географическая привязка данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ);
- эксплуатационная калибровка аппаратуры ДЗЗ;
- валидация и верификация методик и данных ДЗЗ;
- математическое планирование экспериментов;
- разработка и апробация новых методик ДЗЗ;
- разработка новых методик анализа инфраструктуры и подстилающих покровов;
- многоуровневые испытания аппаратуры с синхронными наземными наблюдениями.

Решение поставленных задач обеспечивается путем выполнения следующих видов полигонных работ, характерных для наземных подспутниковых полигонов:

- фенологические наблюдения;
- мониторинг качества воздуха;
- метеорологический мониторинг (на метеоплощадках стандартной и лесной);
- измерение и анализ состава осадков;
- отбор проб и анализ почвы;
- отбор проб и анализ с/х растительности и древесных фитоэлементов;
- оценка состояния наземной растительности;
- оценка прироста и продуктивности древостоев;
- оценка размеров крон и анализ сквозистости;
- построение профилограмм *in situ*;

В работах [2, 3] приводится описание создаваемого стационарного подспутникового полигона «Западная Березина», расположенного на территории учебной станции Белорусского госуниверситета и занимающего площадь 100 кв.км. Основные задачи полигона – наземное обеспечение российско-белорусской программы «Космос-НТ» и белорусской системы ДЗЗ. В целом, характеристики полигона «Западная Березина» имеют значительное сходство с параметрами полигона «Скрипаевский».

Особняком стоят подспутниковые полигоны сельскохозяйственного назначения, основным целевыми задачами которых является валидация спутниковых измерений состояния с/х культур, снежного покрова, процессами вегетации, созревания, состояния посевов, хода посевных и уборочных работ – и распространения результатов, полученных в рамках полигонов, на значительные территории, занимаемыми посевами с/х культур. Решаемые задачи в этих случаях имеет более узкий спектр, но их практическое значение является вполне конкретным и экономически окупаемым. Так, например, создаваемая с 2004 г. сеть подспутниковых полигонов для верификации результатов космического

мониторинга земель республики Казахстан включает в себя до 8 полигонов сельскохозяйственного назначения, размещенных в различных регионах республики (по данным 2006 г). В работе [4] описывается создаваемая сеть 16 подспутниковых полигонов на территории Украины для обеспечения дистанционного зондирования земных покровов с использованием радиолокаторов с синтезированной апертурой. При этом выделяются такие виды полигонов как «калибровочные», предназначенные для калибровки аппаратуры ДЗЗ, «эталонные» – которые включают в себя эталонные тестовые участки с заведомо однородными при различных условиях характеристиками подстилающей поверхности, «тематические» полигоны различного целевого назначения, и «полигоны-стационары», обеспечивающие решение задач полигонов всех типов в непрерывном режиме, к которым относится и подспутниковый полигон «Скрипаевский».

В целом, существующие наземные подспутниковые полигоны отличаются значительным разнообразием своих характеристик, однако их более подробное описание выходит за пределы задач настоящего исследования.

Ниже приводятся несколько нормативных определений, используемых для формализации описания назначения и основных задач подспутниковых полигонов:

а) контрольно-калибровочный полигон – часть поверхности Земли с известными характеристиками, которую используют для калибровки, проверки и поверки технических средств ДЗЗ [5].

б) тестовый полигон – часть поверхности Земли, которую используют для калибровки, проверки и валидации данных ДЗЗ [5].

в) полигон подспутниковый – часть поверхности Земли с известными географическими, геодезическими, спектральными и другими характеристиками, которая может быть использована как источник вспомогательных данных при интерпретации данных ДЗЗ [5].

г) наземный полигон подспутникового сопровождения – часть поверхности Земли с известными характеристиками, которую используют для калибровки, проверки и утверждения данных ДЗЗ [6].

### **1.1.2 Особенности морских и прибрежных подспутниковых полигонов**

Задачи комплексного, в т.ч. спутникового наблюдения (мониторинга) за состоянием морских акваторий относятся к числу наиболее сложных задач дистанционного зондирования – как в силу сложности, многофакторности и трехмерности происходящих в море процессов, так и из-за больших размеров акваторий, которые необходимо охватить регулярными наблюдениями. Процессы, происходящие в морской среде, всегда

наблюдаются в динамике, их изменчивость, как правило, достаточно высока – как по диапазону принимаемых значений, так и по скорости изменения параметров морской среды. В результате этого повторяемость (стабильность) явлений, наблюдаемых на морских акваториях, оказывается недостаточной, а их изменчивость и уникальность – высокой, что не позволяет, как правило, проводить интерпретацию происходящих процессов только путем накопления ретроспективной информации в тех или иных базах данных и ее прямого использования в интересах анализа и прогноза. В силу этой специфики морской подспутниковые измерения и исследования носят, как правило, более глубокий и междисциплинарный характер, чем подспутниковые исследования характеристик суши и растительных покровов.

Современный этап изучения морских акваторий – с середины 90-х годов прошлого столетия по настоящее время – характеризуется заметным снижением активности экспедиционных исследований морей. Проводимые редкие экспедиции имеют региональный характер, затрагивая, в основном, прибрежные области морей. Попутные измерения (постановка на попутные коммерческие суда ограниченного набора измерительных средств) имеют нерегулярный характер и сосредоточены вдоль маршрутов следования коммерческих судов. В этой ситуации большое значение имеет использование автоматических дрейфующих (лагранжевых) буйев, измеряющих и передающих через спутниковые системы связи данные о направлении и скорости течений на горизонтах дрейфа, о температуре воды – либо в точке, либо профили температуры по данным термокос, а для сети профилемеров ARGO – регулярные профили как температуры, так и солености от поверхности до глубин 750-1500-2000 м.

Тем не менее, данные автоматических лагранжевых буйев, в т.ч. вертикально профилирующих, не обеспечивают получение регулярной и полной информации о параметрах морской среды. Траектории буйев зависят от текущих течений. Среднее «время жизни» дрейфующих буйев, особенно дрейфующих в верхнем квазиоднородном слое моря, не превышает для Черного моря нескольких месяцев (реже – до 1-2 лет), после чего буй утрачивается (по различным причинам), т.е. для обеспечения регулярности измерений комплекс дрейфующих буйев нужно регулярно обновлять, что не всегда возможно по техническим или экономическим причинам. Что касается наиболее совершенных ныряюще-всплывающих профилирующих буйев международной сети ARGO – то за период наблюдений с 2005 по 2012 гг. в акватории Черного моря их было выставлено всего 9 экземпляров [7] при «времени жизни» 1-3 года, что далеко не обеспечивает желаемую стабильность и регулярность измерений. Как известно, общая группировка буйев ARGO по Мировому океану в настоящее время поддерживается на уровне 3500-3600 штук, что

является весьма высоким показателем, однако, в Черном море число одновременно работающих дрейфующих буев является крайне недостаточным для обеспечения решения вопросов регулярного регионального мониторинга гидрофизических полей. Тем более, что дрейфтерные измерения не обеспечивают мониторинг экологического состояния моря в силу ограниченного состава измерительной аппаратуры.

Слабость существующего подспутникового судового обеспечения и недостатки дрейфтерных методов морских наблюдений, отмеченные выше, с неизбежностью приводят к необходимости проработки вопросов создания стационарных морских подспутниковых полигонов, способных обеспечить необходимое сочетание выгодных потребительских качеств – высокую стабильность и периодичность измерений параметров морской среды, достаточную тематическую разносторонность физических, химических и биологических наблюдений и их научную содержательность, достаточный территориально-географический охват части прибрежных морских акваторий, обеспечивающий представительность проводимых измерений и получаемых в их результате аналитических и прогностических выводов.

По причинам исторического и экономического характера морские подспутниковые полигоны не являются широко распространенными. Специфика проведения морских работ – их повышенная стоимость, большая зависимость от природных и погодных условий, приливных явлений, резко выраженная сезонность морских измерений – привела к тому, что основные известные морские полигоны на территории бывшего СССР оказались локализованными в черноморском регионе (в меньшей мере – элементы инфраструктуры морских полигонов существуют в Дальневосточном отделении РАН). Основные известные области проведения интенсивных контактных наблюдений, связанных с дистанционными и подспутниковыми задачами, в течение многих лет были сосредоточены вблизи черноморских береговых центров, в той или иной степени связанных с морскими измерениями различного, в т.ч. двойного назначения. Это – прибрежные зоны вблизи п. Кацивели (Крым, Симеиз), вблизи Голубой и Геленджикской бухт (г. Геленджик, Краснодарский край), а также ближние морские зоны в районе Феодосийского залива, Севастопольской бухты и г. Евпатории (Крым).

Черное море является не только удобным и относительно доступным объектом для проведения морских экспериментальных работ, но и очень интересным и уникальным океанологическим объектом. Геоморфология подводного рельефа – замкнутая глубоководная котловина без сильных рельефных особенностей, окруженная сплошной шельфовой окружностью – во многом определяет значительное постоянство его гидрологической стратификации и относительную стабильность преобладающих



бассейновых течений. Господствующим является Основное черноморское течение (ОЧТ), имеющее генеральную циклоническую завихренность и сосредоточенное, преимущественно, в области границ шельфовой зоны. Динамические характеристики ОЧТ испытывают значительные сезонные и межгодовые колебания, а струйный характер течения не является стабильным и испытывает значительные флуктуации по пространству и времени. Изменчивость динамики Черного моря в значительной мере отражается на состоянии и характере перемешивания шельфовых и прибрежных вод, а также на их экологическом состоянии. Сильнейшим фактором, влияющим на экологию шельфовых и прибрежных вод является речной сток, при этом площадь водосбора Черного моря в десятки раз превышает его собственную площадь и охватывает значительную часть Восточной и Центральной Европы. Второй решающий фактор – малая толщина биопродуктивного слоя и наличие огромной сероводородной зоны, занимающей всю глубоководную часть моря от глубин 150-170 м и ниже. В результате этого Черное море является уникальным объектом, сильно подверженным факторам экологического воздействия различных типов, и имеющим ограниченные собственные ресурсы по самоочищению и поддержанию экологической устойчивости. С учетом того, что черноморский регион является традиционным и любимым местом отдыха миллионов жителей России и других причерноморских стран - вопросы сохранения и улучшения качества прибрежных вод, сохранения и воспроизводства морских биоресурсов и их биоразнообразия, дальнейшего развития экономического и рекреационного потенциала приморских регионов – имеют высокий приоритет.

Дальнейшее изложение развития концепции подспутниковых наблюдений в интересах мониторинга, анализа и прогнозирования состояния шельфовой зоны моря в рамках данного исследования будет посвящено, в основном, вопросам создания комплексных средств и методов подспутниковых наблюдений и создания подспутникового полигона на базе Южного отделения ИО РАН (г. Геленджик). В связи с этим, в текущем обзорном материале является уместным рассмотрение определенного круга вопросов, связанных с созданием, развитием, текущим состоянием, а также - перспективами развития примерного близкого аналога геленджикского полигона – старейшей морской исследовательской базы и экспериментального подспутникового полигона в пгт. Кацивели (Крымский федеральный округ РФ).

### **1.1.3 Основные этапы построения и функционирования подспутникового полигона в «Кацивели» (Крым)**

Развитие центра морских исследований в п. Кацивели (Крым, район Большой Ялты, примерно 3 км от п. Симеиз) началось в 1929 г. с создания под руководством В.В.Шулейкина вблизи мыса Кикинеиз и Голубого залива Черноморской гидрофизической станции. Согласно источнику [8] предыстория Черноморской станции имеет более глубокую историю, связанную с неоднократными морскими экспедициями на исследовательском судне «Персей» в 20-е годы в Белом, Баренцевом и Карском морях, организованными Плавучим Морским институтом (Плавморнин, с 1933 г. - ВНИРО), созданном согласно ленинскому декрету в марте 1921 г. В экспедициях, начиная с 1922 г., принимали участие такие известные впоследствии ученые, как В.В.Шулейкин, Н.Н.Зубов, Л.А.Зенкевич, С.В.Обручев, В.Г.Богоров и другие. В ходе проведения гидрологических работ стала ясна необходимость создания постоянно действующего пункта наблюдений, находящегося на берегу моря. При этом приливные явления были бы существенной помехой проведению прибрежных физических измерений. Выбор места для гидрофизической станции в значительной мере принадлежал лично В.В.Шулейкину и определялся выбранными приоритетами исследований – изучению морского волнения, течений, сгонно-нагонных явлений, термики, оптики, акустики моря. В апреле 1929 г. в Ялтинском Совете был принят документ о закреплении «урочища Кацивели» за Московским Физическим институтом для выполнения гидрофизических исследований. В мае 1948 г. был создан Морской гидрофизический институт АН СССР в Москве, а Черноморская гидрофизическая станция стала его филиалом (ЧО МГИ). Это название сохранялось за организацией и после смена юрисдикции МГИ АН СССР и перевода в Севастополь в 1961-63 гг. в статусе организации АН УССР. В 1981 г. было принято новое название – Экспериментальное отделение МГИ (с 1992 г. – ЭО МГИ НАНУ). В настоящее время МГИ и его Экспериментальное отделение вновь находятся под юрисдикцией РФ.

В настоящее время ЭО МГИ развивается как региональный морской полигон физико-климатических и экологических наблюдений. Основными направлениями научной деятельности являются:

- обеспечение регулярными натурными наблюдениями и экспериментальной базой в зоне рекреации и у южного берега Крыма для развития системы геоэкологического мониторинга вод шельфовой и прибрежной зон;
- создание и внедрение на базе морского экспериментального полигона новых технологий контроля состояния среды, биоты, динамики вод и донных наносов;

- развитие научно-технической базы оперативной сети геоэкологического мониторинга, включая стационарную океанографическую платформу, средства маломерного научного флота, гидрографический и гидрометеорологический посты;

- создание и развитие субрегионального морского научно-информационного центра сбора и обмена данными в сети глобальной наблюдательной системы Черного моря;

В числе актуальных перспективных направлений отмечаются следующие:

- геолого-гидрографические исследования с целью установки в п. Кацевели системы комплексного контроля колебаний уровня моря и вертикальных движений земной коры прибрежной зоны Южного побережья Крыма, адаптированной в единую Европейскую сеть мониторинга уровня морей;

- формирование и сопровождение информационных ресурсов (баз данных) для обеспечения научных исследований и прикладной морской деятельности информационной продукцией по морским природным условиям при решении комплекса программно-ориентированных задач Большой Ялты и Южного берега Крыма;

- развитие базовой структуры морского полигона ЭО МГИ для физико-климатических и экологических наблюдений с учетом региональных особенностей в зоне сопряжения суши и моря;

- построение современной морской наблюдательной системы (контрольно-калибровочного полигона) для обеспечения общности контактных и дистанционных измерений.

#### *Стационарная океанологическая платформа*

До конца 1960-х гг. основные измерения морского волнения в Черноморском отделении проводились на т.н. «приборной скале», удаленной на 40 м от берега (рисунок 1.1). Однако для исследования мелкомасштабных процессов в пограничных слоях атмосферы и океана необходимо было максимально уменьшить помехи, вносимые береговым рельефом. В 1969 г. была создана градиентная мачта, удаленную в сторону моря на расстояние около ста метров и установленную на глубине 10 м. На мачте крепились первичные датчики различных физических параметров приповерхностного слоя атмосферы и верхнего слоя моря, сигнал передавался по кабелю в береговую лабораторию (рисунок 1.2). Недостатком градиентной мачты была незначительная высота ее монтажной площадки над уровнем моря (2 м), что не позволяло вести работы в условиях осенних штормов.



Рисунок 1.1 – Приборная скала



Рисунок 1.2 – Градиентная мачта

В процессе эксплуатации приборной мачты возникла идея использовать для долговременных исследований пограничных слоев атмосферы и океана стационарные буровые платформы, используемые для разработки газовых месторождений в Каркинитском заливе Черного моря (район пгт Черноморское). Осложняющим фактором была значительная удаленность буровых платформ от берега, что затрудняло регулярные работы и ограничивало возможности проведения исследований. В 1973 г. в МГИ создается Морской экспериментальный полигон (МЭП), который приступает к созданию автономного буя-лаборатории для установки в акватории Кацевели, однако эта работа не была завершена. В 1977 – 1978 гг. в Госкомитете СССР по науке и технике (ГКНТ) обсуждался вопрос о возможности приобретения океанологического буя «Бора-2» (Франция) с его последующим перебазированием в Черное море и передачей Морскому гидрофизическому институту. После того, как достичь соглашения не удалось, дирекцией института (Б.А.Нелепо) было принято решение о строительстве стационарной платформы в ЭО МГИ с использованием секций одной из буровых платформ, расположенных в Каркинитском заливе, предназначенной к утилизации.

Работы по демонтажу секции буровой платформы проводились силами водолазов МЭП МГИ, которые прошли специальную подготовку в институте электросварки им. Б.Е.Патона. Демонтаж проводился на глубине более 30 м путем направленных взрывов и продолжался более года. В начале 1979 г. демонтированная секция была доставлена и установлена в акватории Голубого залива вблизи Кацевели. Последующие работы, проводимые специалистами МЭП, заключались в оборудовании на платформе лабораторных, жилых и хозяйственных помещений. В мае 1980 г. океанографическая платформа (рисунок 1.3) была введена в эксплуатацию, тогда же ее посетили президенты академий наук России и Украины А.П.Александров и Б.Е.Патон [10].



Стационарная океанографическая платформа сыграла большую роль в дальнейшем развитии морских исследовательских работ на Черном море и в создании на базе ЭО МГИ экспериментального подспутникового полигона.

В 80-х гг. океанологическая платформа являлась одним из важных элементов контрольно-калибровочного полигона (ККП), созданного для метрологической аттестации и оценки качества информации, получаемой спутниковыми комплексами дистанционного зондирования [11]. Для обеспечения подспутниковых наблюдений, на платформе в 80-е гг. устанавливались приборы, работающие в оптическом диапазоне: многоканальный спектрометр МКС-БС, полевой спектрометр ФС, электрофотометр ЭФДН, зонд-фотометр ЗФ-6, другие измерители. Для обеспечения фоновых измерений среды, устанавливались автоматизированные метеостанции, постоянно ведутся непрерывные измерения температуры и солености моря с помощью гидрологического комплекса ИСТОК. Лаборатория адвекции ЭО МГИ проводила непрерывную регистрацию течений. Проводились исследования капиллярно-гравитационных волн, «скин-слоя» и оптических характеристик водной поверхности, которые проводились отделами дистанционных методов исследования, прикладной гидрофизики, оптики моря. В работах, проводимых на платформе, принимали участие космонавты. В 80-е гг. на платформе проводились экспериментальные работы по международному проекту «Интеркосмос-Черное море». В конце 90-х – начале 2000-х гг. выполнялись комплексные подспутниковые биооптические эксперименты для отработки аппаратуры оптического диапазона (совместно со специалистами ФРГ), валидации продуктов космической съемки спектрофотометров МОЗ и МКС (1996 г.), валидации продуктов сканеров MERIS, SeaWiFS, MODIS (2002, 2003 гг.,

совместно со специалистами Франции), в которых участвовали отделы дистанционных методов исследования и оптики МГИ. Так же выполняются многолетние исследования характеристик поверхностного волнения и структуры приводного слоя атмосферы. Усилиями специалистов ЭО МГИ создана и совершенствуется постоянно-действующая сеть мониторинга гидрофизических и метеорологических параметров, включающая в себя стационарную сеть сбора гидрометеорологической и океанографической информации, средства маломерного флота и т.д.

*Концептуальные основы воссоздания морского подспутникового полигона «Кацивели»*

Как утверждают авторы работы [12] морской полигон «Кацивели» в современных условиях способен успешно выполнять функции, присущие подспутниковым полигонам-стационарам, обеспечивающим решение подспутниковых задач практически всех типов. В числе достоинств полигона «Кацивели» приводятся такие соображения:

- географическое положение – полигон «Кацивели» расположен вдали от крупных промышленных центров и защищен от возможного влияния с севера гряды Крымских гор, самая высокая из которых непосредственно прикрывает полигон;

- наличие развитой наблюдательной сети в прибрежной области и наличие малых плавсредств, позволяющих выполнять работы в отрыве от берега, хотя круг таких работ и ограничен;

- развитая сеть транспортных и информационных коммуникаций.

В качестве весомых обоснований воссоздания и развития полигона «Кацивели» приводятся следующие аргументы:

- природные составляющие экологической системы Крыма эволюционируют в худшую сторону, что чревато в будущем невосполнимыми потерями. Одной из основных задач по контролю и возрождению экологического состояния Крыма является создание комплексной системы мониторинга геофизических, гидрофизических, метеорологических, химических и электромагнитных показателей.

- высокая плотность размещения на Южном побережье Крыма объектов рекреации и хозяйственной деятельности, уникальность природных объектов, размещение объектов культурного наследия, обосновывает любые усилия, направленные на предупреждение возникновения чрезвычайных ситуаций и экологических катастроф.

В качестве базовых основ воссоздания подспутникового полигона «Кацивели» называются следующие основные принципы:

- территориально полигон должен охватывать акваторию, ограниченную экономической зоной России с юга, и в пределах дальности возможного радиолокационного

контроля акватории с запада и востока – т.е.  $\approx 80 - 100$  км. Функционально на полигоне можно выделить ближнюю и дальнюю зоны.

- контроль состояния дальней зоны полигона должен обеспечиваться радиолокационными системами наблюдения характеристик морской поверхности – загоризонтными РЛС типа *CODAR* или аналогичными им, системами наблюдения навигационной обстановки – РЛС типа «Океан», «Буревестник» или аналогичных им, данными системы дрейфтеров, спутниковыми данными. Такой комплексный подход позволит, с одной стороны, решать практические задачи наземной поддержки эксплуатации космических систем ДЗЗ, а с другой стороны – обеспечить возможность предупреждения возникновения опасных гидрометеорологических условий, аварийных ситуаций и экологических проблем.

Ближняя зона полигона должна охватывать Голубой залив и прилегающую к нему акваторию. Это область проведения научно-методических экспериментов, отработки моделей гидрофизического мониторинга в контролируемых условиях.

Контроль акватории может осуществляться системой береговых и прибрежных измерительных сетей и аппаратурой, установленной на стационарной океанографической платформе. Общими требованиями к средствам наблюдения являются:

– система сбора информации должна строиться, преимущественно, путем объединения стандартных (промышленных, серийных) средств измерения без их доработок, либо с доработками, касающимися их сопряжения и объединения в единую структуру (без вмешательства в структуру, функциональные узлы и схемы приборов и их конструкцию);

– система сбора информации должна быть открытой, т.е. допускать расширение путем увеличения номенклатуры и количества средств измерения без внесения изменений в аппаратно-программную часть системы;

– отключение (изъятие) отдельных элементов системы для выполнения профилактических и ремонтных работ, метрологической аттестации и поверки не должно приводить к нарушению общей работоспособности системы (в идеале должно быть обеспечено резервирование (дублирование) наиболее ответственных ее элементов);

– измерения выполняются с использованием сертифицированных с учетом национальных и международных стандартов методик;

– персонал полигона, обслуживающий систему, также должен иметь необходимую квалификацию, подтвержденную соответствующими сертификатами.

Статус подспутникового полигона, в широком понимании, не исключает возможности реализации потенциальных возможностей полигона как научно-методического центра

гидрофизического и экологического мониторинга. В качестве основных направлений гидрофизического и экологического мониторинга для полигона «Кацивели» можно назвать:

- контроль параметров поля ветра над акваторией Черного моря на основе использования обзорной спутниковой и контактной (включая результаты моделирования) информации и результатов метеорологических радиолокационных измерений;

- контроль параметров поля волнения в регионе на основе использования спутниковой и радиолокационной (наземной) информации и результатов математического моделирования;

- контроль параметров системы течений в прибрежной области и на акватории Черного моря на основе использования спутниковой альтиметрической информации, данных береговых РЛС и *in situ*-измерений (дрейфующие приповерхностные и всплывающие буи, попутные суда);

- контроль параметров поля температуры морской поверхности с целью информационного обеспечения как промыслового рыболовства (положение морских температурных фронтов) и рекреационной сферы (анализ и прогноз возникновения локальных апвеллингов) и т.д.;

- выявление в зоне ответственности полигона появления пленок поверхностно-активных веществ – несанкционированных выбросов в акваторию Черного моря нефтепродуктов и их содержащих растворов, и прогноз возможных путей их переноса (на основе действующих физико-математических моделей переноса загрязняющих веществ, адаптированной к условиям Черного моря);

- контроль цветковых (био-оптических) характеристик морской воды с целью прогнозирования биологической продуктивности вод, оценки состояния морской экосистемы Черного моря - областей аномального цветения водорослей, прогнозирование возможных заморов рыбы и т.д.;

- контроль процессов в береговых зонах и предотвращение разрушения береговой (пляжной) зоны Крыма на основе комплексного измерения гидрофизических и гидрометеорологических параметров и математического моделирования процессов разрушения пляжной зоны и эффективности мер берегозащиты.

Статус морского подспутникового полигона предполагает выполнение следующих задач и функций:

- измерение основных гидрофизических и метеорологических параметров в зоне ответственности полигона и отработка на основе полученных данных системы информационного обеспечения системы безопасности мореплавания;

- сбор дополнительной гидрологической и метеорологической информации, ее обработка с целью использования в береговых и судовых системах поддержки принятия



решений по обеспечению безопасности мореплавания, обработка взаимодействия с локальными (в т.ч. ведомственными) и глобальными информационными системам соответствующей направленности;

- пополнение, архивирование и анализ базы данных о гидрометеорологической обстановке в зоне ответственности полигона;

- контроль основных гидрографических параметров водной среды с целью обеспечения необходимой информацией аварийных служб при ликвидации последствий аварийных ситуаций, возникающих вблизи зоны ответственности полигона;

- проверка работоспособности моделей и сценариев выполнения аварийных работ по ликвидации последствий морских катастроф в зоне ответственности полигона;

#### **1.1.4 Описание Черноморского контрольно-калибровочного подспутникового полигона**

Работы по созданию морского подспутникового полигона в МГИ АН УССР разворачивались в 80-е гг. XX в., т.е. в период существования СССР, при этом МГИ АН УССР был решениями правительственных органов (СМ СССР, ГКНТ, Комиссия по ВПВ) определен ведущей организацией по созданию и развитию морского контрольно-калибровочного и подспутникового полигона [11, 13, 14].

Черноморский контрольно-калибровочный полигон (ЧККП) создавался в первой половине 80-х гг. на основе Морского экспериментального полигона (МЭП), Экспериментального отделения МГИ и отдельных структур МГИ АН УССР. Основным направлением работ ЧККП в составе создаваемой космической системы «Океан» являлось научно-методическое сопровождение подспутниковых работ. При этом наибольшее внимание уделялось отработке методик определения температуры морской поверхности.

В соответствии с этим, ЧККП был оснащен комплексом контрольно-калибровочных средств (ККС), включающим в себя:

- контрольно-калибровочный пункт;
- авиационную информационно-измерительную систему (самолет-лаборатория);
- судовые информационно-измерительные системы;
- автономные пункты приема и обработки спутниковой информации;
- спецстенд для обработки данных, получаемых с помощью КС «Океан»;
- радиоцентры приема и передачи данных.

Основными режимами работы средств ЧККП являлись:

- рабочий (активный), в котором при пролете КА над акваторией ЧККП на подспутниковую трассу выводилось быстроходное судно «Комета», оснащенное буксируемым

измерителем температуры, и самолет-лаборатория АН-30, оснащенный радиометром, работающим в ИК-диапазоне. Самолет пролетал над трассой на двух высотах, что позволяло оценивать искажения информационного сигнала, вносимые реальной атмосферой. Самолетный радиометр калибровался по данным буксируемого (контактного) измерителя температуры, и эти данные использовались как калибровочные для спутниковых измерений. Хотя добиться полной синхронности спутниковых и подспутниковых измерений не удавалось, это не оказывало существенного влияния на результат вследствие инерционности изменений температуры морской поверхности;

– дежурный, в котором в период между пролетами КА над акваторией Черного моря на ЧККП проводились измерения основных гидрометеорологических характеристик системы «морская поверхность-атмосфера» в мониторинговом режиме;

– технологический, в котором на полигоне осуществлялась предполетная отладка и калибровка элементов бортовых информационно-измерительных комплексов КС «Океан».

Следует отметить, что при создании КС «Океан» под ЧККП понималась акватория всего Черного моря в пределах экономической зоны СССР. Кроме того, для контроля работы оптических средств ДЗЗ использовались также участки акваторий Средиземного моря и Северной Атлантики, имеющие стабильные известные характеристики. Подспутниковые измерения на них обеспечивались экспедициями НИС «Академик Вернадский», «Михаил Ломоносов» и «Профессор Колесников».

В дальнейшем ЧККП трансформировался в Морской экспериментальный полигон «Кацивели», расположенный в зоне сопряжения суши Крымского полуострова и северной части Черного моря у мыса Кикинеиз, занимающий на суше площадь около 14 га, а в акватории Черного моря – район размерами около 1.0 × 1.5 км, вытянутый вдоль побережья. Морские подспутниковые измерения в дальней морской зоне с 90-х гг. более не проводились.

### **1.1.5 Обзор методических материалов, касающихся организации и функционирования Черноморского подспутникового контрольно-калибровочного полигона**

Ниже излагаются методические материалы по организации подспутникового контрольно-калибровочного полигона на базе МЭП и ЭО МГИ в Кацивели в 80-х гг. согласно [11].

На первых этапах работ в области спутниковой океанологии предполагалось, что существуют достаточно точные модели формирования морских сигналов морской поверхностью и разработаны методы экспресс-анализа и последующей комплексной обработки спутниковой и опорной информации. Результаты эксперимента «Океан-Э»

показали, что многие проблемы далеки от своего разрешения, а часть задач требует постоянной отработки и совершенствования. Задачи метрологической аттестации и оценки качества информации, получаемой спутниковыми комплексами дистанционного зондирования, могут быть решены только с использованием специализированных контрольно-калибровочных полигонов (ККП) на акватории которых созданы условия для постоянного контроля как общей гидрометеорологической ситуации, так и необходимых гидрофизических полей.

Учитывая эти обстоятельства, были определены основные задачи, решаемые на ККП:

- отработка методов и средств контрольно-калибровочных намерений,
- отработка методов и средств дистанционного зондирования морских акваторий и атмосферы при строгом контроле гидрометеорологических условий;
- оценка качества функционирования комплексов научной аппаратуры в процессе ее экспериментальной и штатной эксплуатации;
- оценка точности определения гидрофизических характеристик и точности восстановления измеряемых полей по соответствующим эталонным полям ККП;
- отработка методов сбора и обработки контрольной информации, ее оперативной передачи в центры комплексной обработки данных и распространения ее среди потребителей;
- использование акватории ККП как одного из контрольных пунктов для проведения операций внешней калибровки спутниковой научной аппаратуры;
- организация метрологического обеспечения средств ККП и спутниковых средств ДЗЗ.

Можно отметить, что многие из перечисленных задач не потеряли своей актуальности до настоящего времени, и в той или иной степени реализуется при запусках КА развитыми странами.

Проектом создания Черноморского ККП предполагалось его оснащение

- прибрежной стационарной морской платформой, на которой можно было бы осуществлять постоянные измерения широкого спектра параметров морской среды, морской поверхности и приповерхностного слоя атмосферы;
- буксируемой стабилизированной морской платформой, устанавливаемой в любой точке акватории Черного моря также для осуществления измерения широкого спектра параметров морской среды, морской поверхности и приповерхностного слоя атмосферы;
- быстроходным судном «Комета», несущим на борту комплекс гидрофизических приборов, позволяющих измерять характеристики морской поверхности на ходу судна;

- самолетом-лабораторией, несущим на своем борту комплекс дистанционного зондирования (по возможности — аналог спутникового комплекса ДЗЗ) и осуществляющим квази-синхронную съемку акватории и ее съемку в мониторинговом режиме;

- соответствующими стандартными и нестандартными измерительными комплексами экспедиционных судов и самолета-лаборатории;

- комплексом приема и обработки метеорологической факсимильной информации, распространяемой по радиоканалам;

- комплексом приема спутниковой информации, обеспечивающим возможность приема в реальном времени информации, получаемой с помощью отечественных и зарубежных метеорологических, природоресурсных и других КА.

В экспериментальном отделении МГИ АН УССР, ставшем ядром Черноморского ККП, была создана разветвленная сеть сбора океанографической информации и приемопередающий радиоцентр, обеспечивающий в оперативном режиме прием метеорологических данных по региону и, при необходимости, их передачу по радиоканалу в МГИ АН УССР для последующего детального анализа.

Кроме этого, предусматривалась возможность эпизодического подключения к работам на полигоне экспедиционных судов как института, так и других ведомств.

Основной информационно-измерительной системы Черноморского ККП являлся самолет-лаборатория АН-30 с комплексом аппаратуры видимого и инфракрасного диапазонов. Для калибровок аппаратуры дистанционного зондирования использовался корабельный комплекс, установленный на борту судна на подводных крыльях «Комета-673».

Результаты обработки информации позволили выработать общие требования к схеме измерений на ККП для получения репрезентативных данных, пригодных для калибровки спутниковой аппаратуры. Кратко их суть сводится к следующему:

- общая продолжительность измерений не должна превышать трех суток;

- измерения должны проводиться комплексно и квазисинхронно с судовыми и авиационными информационно-измерительными системами (судовые измерения при этом являются калибровочными для самолетных);

- судовые измерения должны выполняться на стандартных трассах, или разрезах, что позволяет оценивать временные изменения контролируемых параметров;

- схема измерений должна позволять восстанавливать искомые поля в узлах *10- или 20-минутной пространственной сетки*;

- методика измерений должна позволять обеспечивать возможность выполнения внешней калибровки авиационных средств в начале и конце каждого цикла измерений.

Экспериментальные работы на Черноморском ККП, выполненные в 80-х гг., в целом, подтвердили действенность методики комплексных измерений и обработки получаемой информации.

### **1.1.5 Общность и отличительные особенности морского полигона «Кацивели» и экспериментального подспутникового полигона ИО РАН**

В результате сравнительного анализа приведенных материалов, касающихся истории, практики, современного состояния и перспектив морского подспутникового полигона «Кацивели» на базе Экспериментального отделения МГИ, можно сделать определенные предварительные выводы, непосредственно касающиеся предмета выполняемого ПНИ.

- история развития Черноморского ККП является значительным и важным этапом в отечественных разработках по созданию морских подспутниковых полигонов, поэтому опыт работ на Черноморском ККП, так же как и последующего развития экспериментальной базы ЭО МГИ имеет существенное практическое значение в ходе выполнения работ по созданию отечественных морских подспутниковых полигонов;

- структура, состав технических средств, методики подспутниковых работ и их практическое наполнение на Черноморском ККП были адаптированы к реалиям 80-х гг. XX в. – по характеру выдвигаемых задач, существующему уровню технического оснащения, возможностям и характеристикам инструментов наблюдения, существующих на то время средств связи, обработки данных и т.д. При этом очень значительное значение имел высокий уровень финансово-экономического обеспечения проводимых работ – достаточный для их проведения, что, к сожалению, трудно достижимо в современных условиях;

- центр тяжести постановки задач в 80-х гг. состоял в калибровке спутниковых датчиков, устанавливаемых на пионерских отечественных КА – оптических, инфракрасных, радиометрических, радиолокационных. В настоящее время имеется значительное количество спутниковых систем и аппаратов ДЗЗ зарубежного производства, которые осуществляют относительно регулярный (в меру их технических возможностей) обзор поверхности Мирового океана. Это позволяет, в значительной мере, проводить перекрестную интеркалибровку спутниковых средств ДЗЗ по уже имеющимся спутниковым и контактными, в т.ч. дрейферным, данным в различных районах океана, что снижает важность задачи технической калибровки аппаратуры по одному фиксированному

прибрежному району (м.б. за исключением технической калибровки альтиметрических средств зондирования);

- в современных условиях на передний план важности выходят задачи интерпретации спутниковой информации – в части углубленного понимания явлений и процессов, происходящих как в приповерхностном, так и в глубинных слоях океана и внутренних морей. Для этого важно проведение углубленных наблюдений характеристик морской среды и их изменчивости системами распределенных датчиков, в т.ч. стационарных профилометрических датчиков;

- полигон «Кацивели» и стационарная океанологическая платформа в настоящее время способны обеспечить квалифицированное измерение параметров морской среды, поверхности и приводного слоя атмосферы только в одной географической точке – что не снижает их значение и является наиболее важным при изучении процессов формирования излучения на границе раздела «вода-воздух» и процессов физического взаимодействия «море-атмосфера». Однако точечный характер измерений не в состоянии обеспечить наблюдение пространственных характеристик динамических объектов, таких как вихревые структуры, меандры, пространственные детали стратификации, и другие особенности ОЧТ, которые играют значительную, а иногда определяющую роль в процессах формирования гидрологического и экологического состояния прибрежных и шельфовых вод;

- в силу особенностей береговой линии (отсутствие близких защищенных портов), регулярные судовые наблюдения на полигоне «Кацивели» оказываются затруднены, это ограничение преодолеть достаточно трудно. Используемые плавсредства, базирующиеся в Кацивели, имеют предельные ограничения по водоизмещению 2-4 тонны, а ближайшие закрытые (всепогодные) порты находятся в Ялте и Балаклаве (расстояние около 20 и 25 км соответственно). Вместе с тем, создание сети донных измерительных станций, подобных используемым на полигоне ИО РАН, на полигоне «Кацивели» в будущем вполне возможно;

- определенное сходство и различие в географических особенностях расположения морских экспериментальных баз и подспутниковых полигонов в районе Голубой бухты (Геленджик) и Голубого залива (Крым, Кацивели) подсказывают вывод, что в качестве будущего основного направления их развития разумно выбрать путь взаимного информационного обмена, развития кооперации, планирования и проведения будущих совместных работ, постепенного сближения направлений и содержания исследований. Этому существенно способствует возвращение Крыма под российскую юрисдикцию, а Морского гидрофизического института – в состав одного из ведущих российских научных учреждений океанологического профиля.

## **1.2 Технологии и методы численного моделирования динамики вод океана и его прибрежных зон**

### **1.2.1 Требования и задачи численного моделирования динамики вод**

Бурный научно-технологический прогресс последних двадцати лет произвел кардинальные изменения в методах исследования океана. Высокоточные дистанционные измерения с искусственных спутников земли (ИСЗ), ретранслируемые через ИСЗ наблюдения со свободно дрейфующих платформ и попутных судов позволяют осуществлять мониторинг текущего состояния океана. Оперативные измерения покрывают широкий спектр пространственно-временных масштабов, включая синоптические и субмезомасштабные процессы. Современные модели циркуляции морей и океанов, основанные на физически полных нелинейных системах уравнений, способны адекватно, не только качественно, но и количественно, воспроизводить реальные процессы, уточняя начальное состояние гидрофизических полей посредством ассимиляции данных натуральных наблюдений. В конце XX – начале XXI века, когда перспектива реализации глобальной оперативной системы наблюдений за состоянием океана стала реальностью, сложились предпосылки для создания современных систем гидродинамических прогнозов Мирового океана, аналогичных атмосферным прогнозам погоды. Развитие интегрированных оперативных систем наблюдений и морских прогнозов является предметом оперативной океанографии – новой ветви океанологической науки [15]. Наряду с климатическими исследованиями это выдвигает новые требования к развитию моделей и методов динамической океанологии. Требуется решать задачи изменений климата, а также среднесрочного и долгосрочного прогноза погоды, где первостепенной задачей становится инициализация океанических полей, формулируемая в рамках теории оптимального управления и сопряженных уравнений [16, 17, 18].

В ведущих странах мира интенсивно развиваются методы и системы моделирования и мониторинга глобальных и региональных природных процессов. Их развитие стимулируется прогрессом математических методов и вычислительных технологий, увеличением мощности вычислительных платформ, созданием новых измерительных комплексов (спутники, плавающие буи и т.д.). Создаются модели климатических систем, описывающие глобальное взаимодействие атмосферы и океана. Совместные модели циркуляции атмосферы и океана участвуют в экспериментах по изучению изменений климата в рамках ряда международных программ. Для изучения гидросферы создаются численные модели и информационно-вычислительные системы, позволяющие анализировать и прогнозировать трехмерную динамику морей и океанов.

В настоящее время повышение качественных характеристик прогностических моделей океана определяется следующими факторами. (1) Повышением пространственного разрешения моделей – описанием фронтов, мезомасштабной и субмезомасштабной изменчивости [19, 20]; (2) синтезом данных натуральных наблюдений и вычислительного эксперимента [21]; (3) постановкой и решением новых прямых и обратных задач оперативной океанографии [15, 22].

Современные системы вычислительного мониторинга и прогноза обрабатывают большие потоки информации, состоящие из двух основных частей: расчетных данных гидродинамического прогноза и данных натуральных наблюдений. Численные модели динамики океана, морей и отдельных морских акваторий – важный компонент современных технологий воспроизведения и анализа природных явлений. Они необходимы как для мониторинга и прогноза глобальной гидросферы, так и для изучения физических процессов, формирующих циркуляцию морей и океанов и ее изменчивость. Роль моделирования повышается в связи с тем, что сбор натуральных данных связан с большими трудностями и высокими затратами. Для достоверного мониторинга и прогноза океанической и морской циркуляции необходимо создание системы усвоения данных и одним из её основных компонентов должна служить физически полная, верифицированная модель, которую можно применять для расчета циркуляции океана, морей и отдельных акваторий. Сейчас сформирована новая фаза исследований, состоящая в синтезе данных наблюдательных и вычислительных экспериментов, повышении точности прогнозирования физических процессов, построении моделей мониторинга природной среды [15, 19].

Планируемые в рамках проекта исследования вбирают в себя современные фундаментальные результаты в области океанологии, вычислительной математики, информатики. Это дает возможность использовать в дальнейшем результаты проекта для создания новых технологий моделирования и анализа сложных природных систем, решать важные прикладные задачи, представляющие экономический и стратегический интерес для России.

### **1.2.2 Характеристика объекта численного моделирования – Черное море**

Черное море является бассейном океанического типа с простой конфигурацией береговой черты, расположенным в умеренных широтах, между 40°56'N и 46°33'N с максимальным размером вдоль долготы, в 1148 км. Самое узкое место Черного моря шириной около 260 км, которое делит весь бассейн на восточную и западную части, находится между южной оконечностью Крымского полуострова и северной точкой выпуклости Анатолийского побережья. Черное море является практически замкнутым



бассейном. Оно соединено с Мраморным и Азовским морями только узкими проливами. Средняя глубина Черного моря составляет около 1300 м, а его максимальная глубина превышает 2200 м (рисунок 1.4).

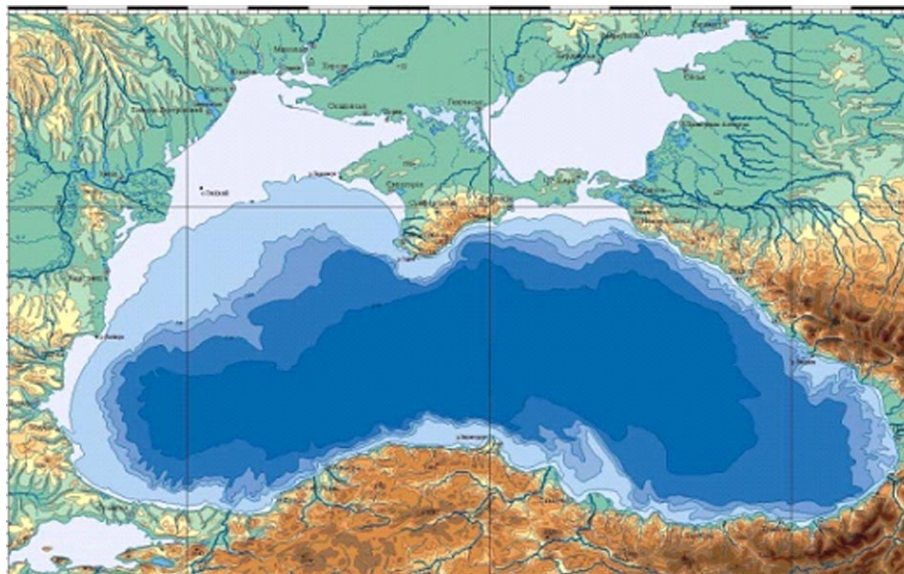


Рисунок 1.4 – Конфигурация и топография дна Черного моря

Главным элементом циркуляции вод в верхнем слое моря является основное черноморское течение (ОЧТ), опоясывающее глубоководную часть Черного моря и формирующее крупномасштабный циклонический круговорот, включающий в себя два циклонических круговорота меньшего размера, расположенных в западной и восточной частях бассейна. Формирование этих круговоротов, вероятно, обусловлено конфигурацией побережья моря [23].

ОЧТ имеет ширину 40-50 км и располагается над свале глубин континентального склона. Прямые наблюдений скорости течения с помощью поверхностных дрейфующих буев и акустических измерителей ADCP показывают, что максимальная скорость потока ОЧТ как правило достигает 40-50 см/с, но иногда увеличивается до 80-100 см/с. ОЧТ сконцентрировано выше основного пикноклина, а его расход оценивается в 3-4 Св.

Анализ крупномасштабных гидрологических съемок, спутниковых наблюдений и вихререзающих численных расчетов показывает, что мгновенная картина поверхностных течений отличается от регулярного круговорота вследствие сильной синоптической изменчивости [24, 25]. Наиболее известным среди них является Батумский антициклон, вихрь в юго-восточном углу бассейна. Антициклонические синоптические вихри образуются также у мыса Калиакра, вблизи Босфора, вдоль Анатолийского и Кавказского побережья, у южного побережья Крыма. С высокой регулярностью происходит образование так называемого Севастопольского антициклона. Анализ

альтиметрии и результатов численных расчетов показывает, что наиболее часто этот вихрь образуется при обтекании ОЧТ мыса Херсонес, являющегося западной оконечностью южного берега Крыма. В этом отношении формирование Севастопольского антициклона подобно образованию вихрей при обтекании крыла самолета.

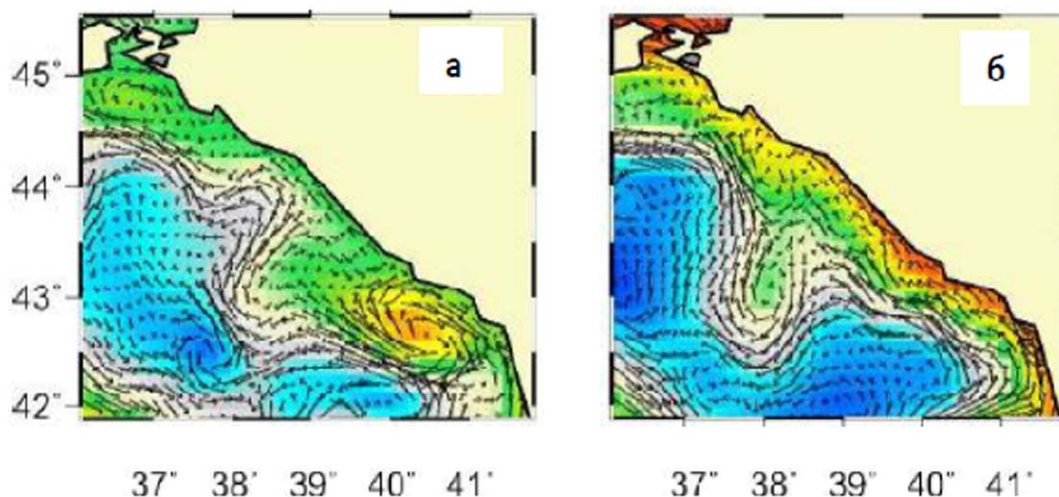


Рисунок 1.5 – Пример синоптической изменчивости у Кавказского побережья Черного моря по данным альтиметрии: *а* – меандр ОЧТ и прибрежный антициклонический вихрь, *б* – формирование нового антициклонического вихря при углублении меандра ОЧТ

Многообразие синоптических процессов в Черном море в виде меандров ОЧТ и синоптических вихрей и их подобие океанским было установлено еще в 80-е годы прошлого века (рисунок 1.5). На основании анализа данных межведомственной экспедиции было показано, что синоптические вихри наблюдаются не только у побережья, но и в открытом море. Дальнейшие исследования, основанные на анализе космических снимков поверхности моря в ИК и видимом диапазоне спектра электромагнитных волн и альтиметрических наблюдений показали [24], так же, как и в океане, синоптические вихри и меандры ОЧТ являются неотъемлемым элементом черноморской динамики [23, 25].

Анализ большого количества спутниковых изображений поверхности моря в видимом и ИК-диапазонах спектра электромагнитных волн показывают, что в Черном море наблюдаются многообразные субмезомасштабной процессы – вихри малых размеров, термические фронты, филаменты – характеристики изменчивости. Поверхностные течения с разрешением в один км, восстановленные на основе обработки последовательности космических снимков морской поверхности, показывают, что сопутствующие вихри меньшего масштаба возникают на фронтальной зоне синоптического вихря. Поток ОЧТ, который отображался сплошной рекой даже на картах, построенных по данным

альтиметрии с разрешением порядка семи километров, оказался разбитым на серию мелкомасштабных струй. При этом скорости субмезомасштабных течений на 40-50% превышали типичные скорости орбитальных движений в синоптических вихрях. Таким образом, субмезомасштабные процессы в Черном море, как и в Мировом океане, могут играть заметную роль в переносе энергии по спектру масштабов. Их учет в моделях циркуляции морей и океанов может повысить качество и продолжительность прогнозов.

Весьма перспективным в этой связи является исследование прогностических возможностей моделей с повышенным пространственным разрешением, позволяющих явно разрешать мезо и субмезомасштабы. В настоящее время подготовлена модель гидродинамики Черного моря с улучшением пространственного разрешения у берегов России [26]. На рисунке 1.6 приведен результат ее расчета. Он демонстрирует улучшение воспроизведение особенностей прогнозируемых характеристик в зоне повышенного разрешения.

Заканчивая обзор основных процессов, протекающих в Черном море, отметим также, что бассейн предоставляет все условия для моделирования взаимодействия глубоководных процессов с шельфом, поскольку в Черном море есть и широкая мелководная область на его северо-западе и узкий континентальный склон, вдоль которого распространяются разные виды захваченных волн.

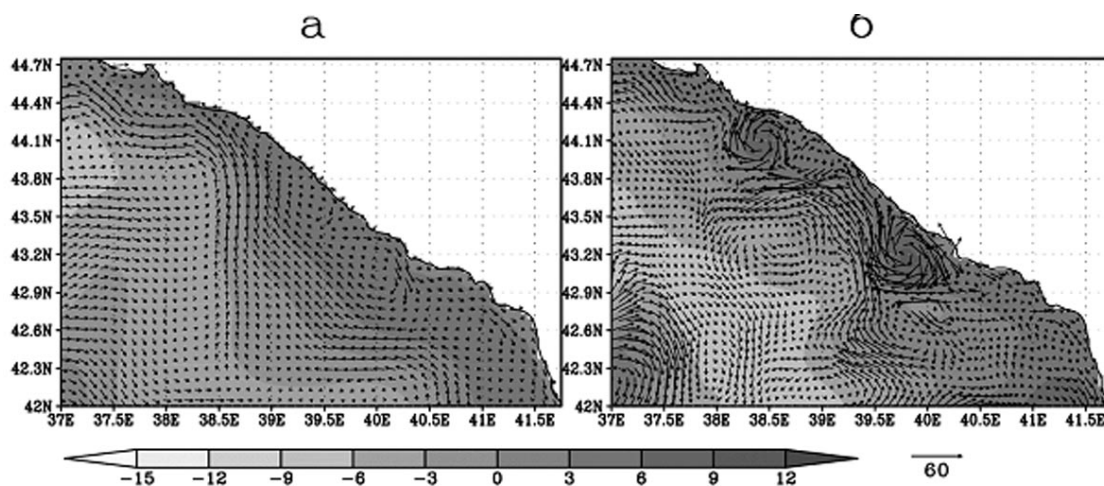


Рисунок 1.6 – Модель ИВМ РАН. Поля скорости приповерхностных течений (стрелки) [см/с] и уровня (градации серого) [см] на 14.04.2007: *а* – по модели с разрешением порядка 4 км, *б* – по модели с улучшенным разрешением у берегов России.

Масштаб стрелок скоростей и уровни градаций серого показаны под рисунком

В глубоководной части бассейна наблюдается тонкая структура; двойная диффузия, обрушения внутренних волн, т.е. все процессы, обеспечивающие диапикническое перемешивание. Таким образом, практически все наиболее значимые явления, типичные для Мирового океана умеренных широт, имеют свои аналоги в черноморском бассейне.

Учитывая почти полную замкнутость моря, простоту его конфигурации и относительную эквивалентность (в единицах радиуса Россби) типичному океаническому круговороту, можно сказать, что Черное море является весьма удобной естественной лабораторией для разработки методов прогноза морской среды нового поколения.

### **1.2.3 Численное моделирование динамики Чёрного моря**

Бурное развитие оперативной океанографии в течение последних 20 лет, вызванное главным образом развитием вычислительной техники, даёт возможность проводить исследования изменчивости морской среды в широком интервале пространственно-временных масштабов на совершенно новой основе. Ассимиляция разнородных наблюдений в моделях циркуляции вод морских или океанических бассейнов позволяет интерполировать измерения на регулярную в пространстве и во времени сетку оптимальным образом с оценкой точности представляемых массивов данных расчетов. Дальнейшее использование регулярных массивов данных позволяет воспроизводить характеристики изменчивости морской среды и исследовать механизмы её формирования. Применительно к черноморскому бассейну широкие возможности исследований даёт созданная в МГИ система диагноза и прогноза гидрофизических полей Чёрного моря, доведённая до европейских стандартов в проектах шестой и седьмой рамочных программ «ЕСООР» и «MyOcean», «MyOcean2» [27, 22]. Отдельные модули созданной системы диагноза и прогноза полей Чёрного моря включают также реанализ гидрофизических полей моря посредством ассимиляции спутниковых наблюдений уровня моря и океанографических наблюдений температуры и солёности в разработанной ранее вихререзающей модели циркуляции вод Чёрного моря. К настоящему времени в Черноморском Центре Мониторинга и Прогноза (ЧМЦМП), являющемся элементом общеевропейской системы морских прогнозов, были созданы три продукта по ретроспективному анализу динамики Чёрного моря. Являясь единственными продуктами реанализа для черноморского бассейна, эти массивы пользуются спросом у потребителей, оформляющих запросы через сайт проекта MyOcean. Крупномасштабные гидрофизические поля моря восстановлены в реанализе за период 1971–1993 гг. [28, 29] и более близкие к настоящему времени годы (1993–2012 гг.). Реанализ гидрофизических полей за период 1971–1993 гг. для бассейна Черного моря был выполнен впервые с использованием модели ROM [28], а затем и по модели МГИ [29], имеющей более удобную сетку, на которой производятся расчеты гидрологических полей. Горизонтальное разрешение ROM модели составляло 8.1 км вдоль параллели и 6.95 км вдоль меридиана. Шаг сетки по горизонтали в модели МГИ равнялся 5 км. В обеих моделях ассимилировались среднемесячные данные

измерений температуры и солености за 1971–1993 годы. Атмосферное воздействие задавалось по данным глобального реанализа ERA-40. По данным черноморского реанализа 1971–1993 гг. исследовалась сезонная и межгодовая изменчивость крупномасштабных гидрофизических полей: температуры, солености, скорости течений и кинетической энергии [28]. Реанализ за период 1993–2012 гг., находящийся в открытом доступе [30], также дает представление об изменчивости полей Чёрного моря в этот промежуток времени, согласуясь с результатами обработки наблюдений [31]. Однако точность воспроизведения полей температуры и солености в этом реанализе не вполне удовлетворительна для детального исследования характеристик изменчивости, что связано с малочисленностью данных гидрологических зондирований на протяжении рассматриваемого периода.

В настоящее время в МГИ планируется использовать технологию вложенных сеток (нестинга) для более точного воспроизведения прибрежной циркуляции. Здесь в качестве основного инструмента используется Европейская система моделирования океана NEMO (Nucleus for European Modeling of the Ocean). Система моделирования непрерывно развивается сообществом разработчиков, в которое входят ведущие организации Европы, занимающиеся вопросами оперативной океанографии и климатических изменений океана. Одним из компонентов является модель циркуляции океана NEMO-OPA, основанная на полной системе уравнений гидротермодинамики океана в приближении Бусинеска и гидростатики. Модель реализована на достаточно высоком уровне и позволяет выполнять расчеты в параллельной среде (на высокопроизводительных компьютерах и вычислительных кластерах). В системе имеется ряд дополнительных инструментов, связанных с решением задач современной океанографии. Например, инструмент AGRIF, позволяющий создавать региональные конфигурации на основе бассейновой (глобальной) конфигурации и двустороннего нестинга (метода вложенных сеток). Разработана система вариационной ассимиляции данных NEMOVAR, которая позволяет усваивать различные виды измерений в модели. Реализация нестинга на основе данной модели решается впервые.

Наиболее близкими к теме настоящей ПНИ являются работы, посвященные моделированию процессов в прибрежных частях Черного моря, в Азовском море и Керченском проливе, выполненные в МГИ при участии В.В.Фомина. Они объединены в монографию [32]. В этой монографии дан подробный анализ и обобщение возможностей в 2000-х гг. математического моделирования и результатов натурных исследований динамических процессов в зоне сопряжения море – суша. На основе модели POM реализована совместная численная модель течений и поверхностных волн для исследования

динамических процессов в зоне сопряжения море - суша и решения задач комплексной оценки воздействия на окружающую среду при хозяйственной деятельности. Сравнительный анализ данных совместного и отдельного моделирования позволил получить новые результаты, касающиеся взаимного влияния волн и течений в модельных и реальных бассейнах.

Динамика мелкого моря представляет собой замкнутую систему уравнений описания течений, сгонно-нагонных процессов, поверхностного волнения и транспорта веществ. На основе согласованных параметризаций учтены все основные физические механизмы взаимодействия между течениями и поверхностными волнами в мелководных акваториях. Численная модель циркуляции вод учитывает механизмы влияния поверхностного волнения на течения; перемещение боковых границ под воздействием сгонно-нагонных процессов; донные деформации, обусловленные эффектами эрозии дна и аккумуляции наносов. Основные особенности алгоритма циркуляционной модели позволяют адекватно описывать поля с сильными пространственными градиентами.

Совместное моделирование стационарных полей ветровых течений и поверхностного волнения в Керченском проливе при разных типах ветровых ситуаций показало значимость учета взаимодействия между волнами и течениями при моделировании динамических процессов в проливе.

#### **1.2.4 Использование численного моделирования для расчетов распространения речных плюмов и связанных с ними загрязнений от локальных источников у побережья**

Уже в древности было хорошо известно одно из главных определяющих свойств вод речного плюма, а именно, его относительно низкая на фоне окружающих морских вод плотность. Однако, ввиду относительно малых масштабов, интенсивной временной изменчивости, а также резких граничных градиентов, характерных для приустьевых зон смешения, развитие измерительной океанологической техники лишь в середине прошлого века достигло уровня, позволяющего проводить целенаправленные натурные исследования опресненных линз материкового стока в прибрежной зоне моря. К этому периоду относятся первые систематические научные работы, посвященные распространению речного стока в приустьевых зонах [33]. Тогда же были предприняты первые попытки математического описания процессов, отвечающих за формирование полей солёности и скорости течения и диффузию в этих зонах [34], а также их лабораторного моделирования [35]. В течение следующего десятилетия продолжалось развитие исследований распространения речного стока, как в контексте общих процессов, характерных для зон смешения речных и морских

вод [36], так и в рамках специализированных исследований приустьевых областей некоторых конкретных рек, таких как Колумбия, Коннектикут, Амазонка и Миссисипи [37, 38]. Однако вплоть до середины 70-х годов исследователи не рассматривали плюмы как обособленные структуры. Впервые это было сделано в работах [39, 40], посвященных математическому описанию гидродинамических процессов в зонах смешения, где и было введено в употребление понятие «речной плюм». Наряду со значительным прогрессом в области натурных измерений в зонах приустьевого взморья, существенные продвижения в изучении опресненных линз в 1970-е годы были связаны с появлением методов дистанционного зондирования, вначале авиационного [38], а затем и космического [41]. В результате быстрого развития программно-аппаратного комплекса для космических исследований, а также создания в конце 1970-х годов специализированных океанологических искусственных спутников Земли, спутниковый мониторинг стал важным методом исследования речных плюмов наряду с натурными измерениями, математическим и лабораторным моделированием. Начиная с этого времени, стали появляться публикации, рассматривающие речные плюмы в контексте мезомасштабных океанических фронтов [42, 43], и первые работы, посвященные воздействию ветра на динамику плюма [44]. Продолжение лабораторных и теоретических исследований гидродинамических процессов, связанных с распространением речного плюма, в первой половине 1980-х годов происходило на фоне постоянного роста производительности вычислительных средств, в результате чего уже к середине 1980-х годов численное моделирование стало одним из основных методов исследования динамики речных плюмов [45, 46].

Отрезок времени с середины 1980-х годов и вплоть до настоящего момента можно рассматривать как современный период в истории изучения речных плюмов. За эти 30 лет вопросам распространения речного стока в приустьевых зонах смешения было посвящено значительное количество публикаций. Современные исследовательские работы сочетают в себе натурные измерения, спутниковые наблюдения, гидродинамическое математическое, лабораторное и численное моделирование, что позволяет изучать как региональные особенности изменчивости областей опреснения различных приустьевых районов, так и фундаментальные закономерности динамики речных плюмов.

К настоящему моменту лучше всего изучено «свободное движение» плюма, т.е. движение в отсутствии внешних воздействий [47, 48]. В этом идеализированном случае его поведение целиком определяется следующими параметрами: шириной и глубиной устья реки, скоростью стока, батиметрией и вертикальной стратификацией на прилегающем шельфе, а также параметром Кориолиса. Одним из главных безразмерных характеристик динамики плюмов является стоковое число Кельвина  $K$ , которое определяется как

отношение между пространственным горизонтальным масштабом плюма и бароклинным радиусом деформации Россби [49]. В случае, когда  $K \ll 1$ , влияние силы Кориолиса на поведение плюма пренебрежимо мало по сравнению с инерционными эффектами, которые определяют нелинейную динамику плюма [50, 48]. Напротив, при  $K \geq 0(1)$ , сила Кориолиса значимым образом воздействует на распространение плюма, отклоняя речной сток вправо/влево от устья в Северном/Южном полушарии [49].

В работах [51, 52] была предложена классификация приустьевых областей опреснения по их вертикальной структуре, в рамках которой плюмы делятся на приповерхностные («surface-advected») и сохраняющие контакт с дном («bottom-advected»). Приповерхностным плюмом, в соответствии с этой классификацией, называется тонкий по сравнению с глубинами окружающего моря опресненный поверхностный слой, растекающийся над более плотными морскими водами, что обеспечивает устойчивую вертикальную стратификацию (рисунок 1.7). Плюм, сохраняющий контакт с дном, охватывает всю толщу вод от поверхности до дна и испытывает трение с дном даже на большом расстоянии от устья реки. Толщина такого плюма, как правило, превышает глубину реки в устье (рисунок 1.8).

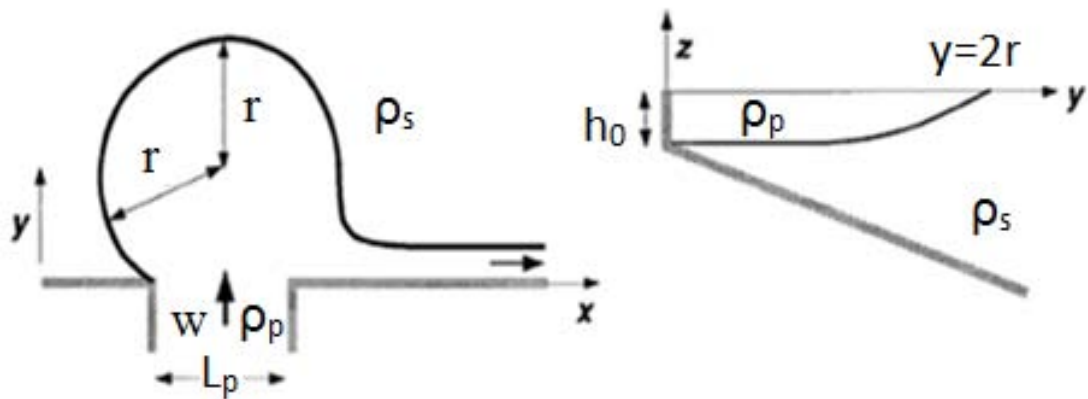


Рисунок 1.7 – Горизонтальная (слева) и вертикальная (справа) схемы распространения приповерхностного плюма в отсутствии внешнего воздействия, заимствовано из [52]



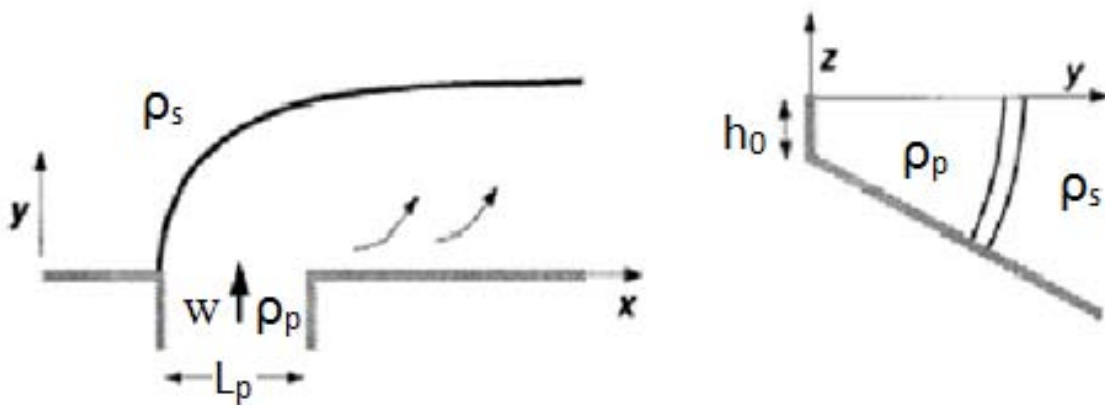


Рисунок 1.8 – Горизонтальная (слева) и вертикальная (справа) схемы распространения плюма, сохраняющего контакт с дном, в отсутствие внешнего воздействия, заимствовано из [52]

Попадая в море, вся пресноводная струя под воздействием сил горизонтального градиента давления, инерции и Кориолиса распространяется в направлении стока реки, постепенно отклоняясь вправо/влево от устья в Северном/Южном полушарии. Если плюм сохраняет контакт с дном (рисунок 1.8), то придонный экмановский перенос способствует перемещению плотностного фронта в сторону открытого моря, так что «равновесная» ширина плюма будет достигаться при исчезновении экмановского переноса, когда вертикальный градиент скорости в струе, обеспечивающий нулевую скорость на дне, будет удовлетворять условию термического ветра. Зная физические параметры речного потока, можно рассчитать горизонтальный масштаб поверхностного растекания плюма с помощью формулы

$$y = 2r = \frac{2(3gh_0 + w^2)}{f\sqrt{2gh_0 + w^2}}$$

где  $r$  – радиус антициклонического вихря,  $g$  – редуцированное ускорение свободного падения, связанное с разностью плотностей воды в плюме и окружающем море ( $\rho_s - \rho_p$ ),  $w$  – скорость стока реки,  $h_0$  – глубина реки в устье,  $f$  – параметр Кориолиса. Также, воспользовавшись условием исчезновения экмановского переноса, можно рассчитать вертикальный масштаб плюма, т.е. глубину, вплоть до которой плюм сохраняет контакт с дном [52]. Если глубина реки в устье превышает значение  $h$ , то формируется полностью приповерхностный плюм. Напротив, если изобата  $h$  расположена ближе, чем на расстоянии  $y$  от берега, то формируется плюм, полностью сохраняющий контакт с дном. В промежуточных условиях, когда расстояние от берега до изобаты  $h$  больше нуля, но меньше  $y$ , формируется смешанный вид плюма, распространяющийся в придонном слое до изобаты  $h$ , а в приповерхностном на расстояние  $y$ . Оба этих параметра зависят лишь от параметров реки, что делает возможным априорную оценку масштабов вертикального и

горизонтального распространения плюма в отсутствии внешнего воздействия, что, в свою очередь, позволяет определить его тип. Реки, впадая в море, в большинстве случаев образуют приповерхностные плюмы, ввиду большой разницы плотностей морской и речной воды, в результате чего вертикальный масштаб плюма  $h$ , как правило, меньше глубины реки в устье. Данная диссертационная работа посвящена изучению именно таких плюмов, и в дальнейшем под понятием «плюм» будет подразумеваться «приповерхностный плюм».

Итак, в отсутствии внешнего воздействия поверхностная линза речных вод стремится принять характерную форму «свободного плюма», которую можно условно разделить на две составные части. Первая часть приурочена к приустьевой области и имеет округлую форму, именуемую линзой («bulge» в англоязычной литературе) (рисунки 1.7, 1.9). Она представляет собой антициклонический вихрь, находящийся в состоянии циклострофического баланса. Вторая часть плюма представляет собой квазигеострофическое компенсационное вдольбереговое течение, направленное направо/налево от устья в Северном/Южном полушарии [53, 47, 48]. При отсутствии внешнего воздействия и при малой толщине плюма относительно глубины моря ( $4h < H$ , где  $H$  глубина моря) [54] большая часть поступающей из реки пресной воды аккумулируется в антициклонической линзовидной структуре, горизонтальные размеры которой в идеальном случае неограниченно, хотя и медленно, увеличиваются со временем, поскольку равновесное состояние никогда не достигается. Это явление называется «надувание» («ballooning»). Форма и динамика плюма определяются начальной скоростью речной струи, а также геометрией устья и береговой линии [55, 56]. Чем больше число

Россби у речного потока  $Ro = \frac{w}{fL_m}$ , тем более округлую форму принимает антициклоническая часть плюма и тем меньший объем воды переносится компенсационным течением. Подобная же зависимость наблюдается и от размера угла между направлением речного стока и берегом справа от устья. Чем меньше этот угол, тем меньше радиус у антициклонического вихря, и тем большую часть поступающей воды переносит компенсационное течение. Речной сток с большим числом Россби формирует более толстые плюмы, в результате чего горизонтальные размеры их антициклонических линзовидных структур увеличиваются медленнее, чем в случае стока с малым числом Россби [57].

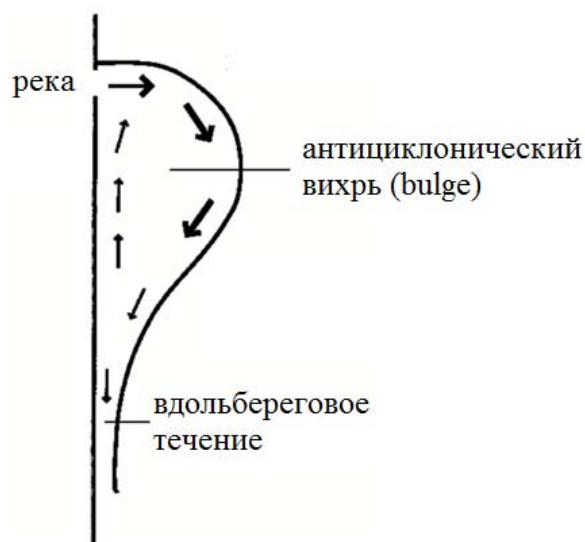


Рисунок 1.9 – Характерная форма «свободного плюма»: антициклонический вихрь и компенсационное вдольбереговое течение, по [58]

Условие отсутствия внешнего воздействия на линзу речного стока является, безусловно, идеализированным предельным случаем. Многочисленные натурные наблюдения показали, что в реальных условиях динамика плюма при взаимодействии с атмосферой и окружающим морем существенно отличается от динамики «свободного» плюма. Для реальных плюмов характерна высокая пространственно-временная изменчивость, которая зависит от большого числа внешних вынуждающих факторов. В их число, в первую очередь, входит действие местных ветровых полей, а также фоновых прибрежных течений и приливных колебаний [58, 59, 60]. Эти воздействия в зависимости от их интенсивности могут кардинально изменять как площадь, форму и структуру области опреснения, так и процессы перемешивания с окружающими морскими водами [58].

Несмотря на большое количество исследований, посвященных взаимодействию речных плюмов с окружающим океаном и атмосферой, ввиду сложности механизмов движения и диссипации речных плюмов в прибрежной зоне моря, многие фундаментальные аспекты этих процессов остаются по-прежнему неизученными. В частности, до сих пор нет полной теории поведения речного плюма в зависимости от силы и направления ветра.

Речные плюмы могут иметь различные пространственные масштабы, которые, в первую очередь, зависят от объема формирующего плюма материкового стока. Поведение плюмов, образованных малыми и большими реками, значительно отличаются друг от друга ввиду разных физических масштабов приустьевых процессов и разных типов водного режима больших и малых рек [49, 61]. Изменчивость и динамика небольших опресненных линз, ввиду их малых пространственных размеров и, как правило, короткой

продолжительности паводковых периодов у малых рек, их образующих, в наибольшей степени определяются синоптической изменчивостью внешнего воздействия. В этих случаях даже кратковременное ветровое воздействие может существенно влиять на расположение, площадь, форму и структуру речного плюма [62]. В то же время, принято считать, что для рек с большим стоком и продолжительным паводком характерные временные интервалы изменчивости плюмов достигают масштабов сезона [63].

Географическая широта места также существенно влияет на плюм, поскольку определяет силу воздействия вращения Земли на распространение линзы материковых вод. Так, плюм реки Амазонка, впадающей в океан непосредственно на экваторе, при отсутствии внешнего воздействия не стремится отклониться ни вправо, ни влево от устья, что существенным образом выделяет его динамику среди плюмов рек, расположенных вне экваториальной зоны. Кроме того, климатическая зона определяет водный режим реки, образующей плюм, и, тем самым, временные масштабы его изменчивости. Наконец, региональные батиметрия и форма береговой линии, а также угол впадения реки в море образуют еще одну группу факторов, от которых зависит динамика распространения речного стока [64, 65].

Плюмы крупнейших рек мира, таких как Амазонка, Янцзы, Миссисипи, Колумбия, Хуанхэ или Дунай в целом, изучены гораздо лучше, по сравнению с плюмами рек малого и среднего размеров. В мире есть большое количество густонаселенных прибрежных регионов, распространение речного стока в шельфовой зоне которых вообще никогда не исследовалось.

Одной из причин подобной ситуации является сложность и трудоемкость натуральных исследований речных плюмов, которые вызваны их высокой временной изменчивостью, а также резкими градиентами на их границах. В силу этого, для того, чтобы зафиксировать как мгновенное состояние плюма, так и его динамику, измерения в опресненной линзе целиком или в какой-то ее области необходимо производить быстро, но при этом пространственное разрешение измерений должно быть достаточным для наблюдения за тонкой структурой на ее границах. Эти требования делают необходимыми разработку специализированных методик высокоразрешающих, как по времени, так и по пространству, измерений. Использование спутниковых изображений позволяет, с одной стороны, решить проблему «мгновенного» наблюдения области опреснения, а с другой стороны, производить относительно регулярный мониторинг ее пространственного распространения в зависимости от состояния облачности. Однако спутниковые наблюдения ограничены лишь поверхностью моря и не затрагивают трехмерную структуру плюмов, кроме того,

дискретность этих наблюдений имеет порядок десятков часов и более, что явно недостаточно для разрешения мелкомасштабной временной изменчивости.

Эффективным методом исследования динамики речных плюмов служит численное моделирование. Большая часть моделей, которые в настоящее время применяются для имитации формирования и эволюции речного плюма, основаны на решении уравнений Навье-Стокса, т.е. эйлеровых трехмерных уравнений движения с различными схемами замыкания турбулентного перемешивания [60]. Эйлерова модель в некоторых случаях дополнялась внешним модулем, который рассчитывает траектории трассеров на основе вычисленного поля скоростей. Подобная процедура позволяет визуализировать процессы переноса отдельных компонент материкового стока в морской среде, а также связанных с ним загрязнений и других примесей [66]. Эйлеровы модели плюмов, однако, имеют серьёзный принципиальный недостаток, связанный с тем, что фиксированное горизонтальное и вертикальное разрешение расчетной сетки во многих случаях не позволяет корректно воспроизводить процессы в районах высоких градиентов у границ речных плюмов. Увеличение разрешения, в свою очередь, приводит к степенному росту необходимой мощности вычислительных ресурсов.

Альтернатива эйлеровым моделям состоит в использовании лагранжевых методов слежения за движением и диссипацией линзы речного стока. При таком подходе плюм представляется в виде множества отдельных частиц, для каждой из которых индивидуально решаются уравнения движения и диффузии, которые задают эволюцию во времени, и интерполяция по всей совокупности частиц в каждый момент времени определяет расположение и структуру области опреснения. Таким образом, с одной стороны, фиксированная интерполяционная сетка заменяется на динамическую, что позволяет с существенно меньшими вычислительными затратами моделировать процессы в зонах высоких градиентов. С другой стороны, внешние воздействия на плюм в рамках лагранжевой модели задаются естественным образом через индивидуальные уравнения движения частиц и не повышают сложность модели. Подобная идеология моделирования динамики плюма коренным образом отличается от расчёта траекторий трассеров в рамках эйлеровых моделей, упоминавшихся выше, так как в них поле скоростей де-факто задается эйлеровыми уравнениями.

Экономичность лагранжевых моделей по отношению к вычислительным ресурсам, делает возможным подробное исследование процессов, связанных с речным стоком посредством проведения большого числа численных экспериментов, имитирующих отклик опресненной линзы на изменения различных внешних параметров, таких как ветер, фоновая океаническая циркуляция, скорость истечения реки, параметр Кориолиса и т.д.

Внутренним ограничением лагранжевых моделей является их принципиальная неспособность отобразить воздействие плюма на окружающий океан. Это ограничение, вообще говоря, является очень серьезным, однако оно оказывается допустимым, например, для плумов рек малого и среднего размеров, обратное влияние которых на океан может считаться малым [64]. Для имитации поведения стоковых линз, образованных большими реками, использование лагранжевого подхода также возможно, однако требует более аккуратного анализа результатов и оценки степени их достоверности.

Совместное использование теоретических, натуральных и численных методов служит хорошим инструментом для исследования речных плумов.

### **1.2.5 Применяемые методики и подходы в численного моделирования процессов распространения речных плумов и связанных с ними загрязнений от локальных источников у побережья**

Как обсуждалось выше, наряду с натурными измерениями и спутниковыми наблюдениями, гидродинамическое численное моделирование является важнейшим методом изучения изменчивости и динамики распространения речного плюма. В течение последних 40 лет численные модели получают все большее и большее распространение ввиду постоянного роста производительности вычислительных систем. К настоящему моменту для моделирования поведения речных плумов, в основном, используются трехмерные эйлеровы модели циркуляции, а также ряд региональных моделей, созданных на их основе [66]. Эйлеровы модели интерпретируют речной плюм как неотъемлемую часть океана, и для описания динамики плюма и окружающей морской воды используются единые уравнения. Такой подход, однако, не всегда наилучшим образом соответствует физике процессов ввиду фактической «инородности» плюма окружающему океану и свойственной его границам высокой пространственно-временной изменчивости. Именно поэтому, несмотря на быстрое развитие вычислительных мощностей, эйлеровы модели являются громоздкими в вычислительном отношении и требуют при использовании значительных технических и временных ресурсов. При моделировании распространения речного плюма можно обойтись без одновременного решения большого числа громоздких уравнений переноса солёности и сохранения импульса во всей приустьевой зоне, но при этом добиться хорошего соответствия результатов моделирования натурным измерениям. Для решения этих задач разрабатывается численная лагранжева модель, имитирующая процессы распространения пресноводного стока в сильно стратифицированном верхнем слое моря под влиянием напряжения трения ветра, во взаимодействии с фоновой морской циркуляцией и с другими внешними факторами. Моделирование поведения речного плюма

происходит посредством воспроизведения движения отдельных «частиц» стока в море. Частица в модели представляет собой элементарную однородную колонну воды, простирающуюся от поверхности вниз до границы между плюмом и нижележащими морскими водами. Частицы испускаются из речного устья с регулярными временными интервалами и с начальной скоростью, зависящей от средней скорости течения в реке. Средняя скорость истечения реки  $W_r$  и средний угол истечения реки  $\alpha_r \pm \alpha_{\Delta r}$ , определяемые геометрией устья, задают равномерное распределение вероятности для начальных модуля и вектора скорости частицы, испускаемой из речного устья [64].

Начальные значения координат, плотности и высоты каждой новой частицы задаются равными координатам речного устья, плотности речной воды и глубине реки в устье соответственно. Число частиц, испускаемых из устья в единицу времени на каждом шаге, полагается пропорциональным объему стока реки во время этого шага.

Дальнейшее движение индивидуальной частицы определяется балансом сил, приложенных к ней. Интерполяция физических параметров: солёности, плотности, высоты и т.д. всей совокупности частиц на регулярную сетку в каждый момент времени задает речной плюм, и, таким образом, моделируется его эволюция во времени.

На каждую отдельную частицу действуют следующие силы: сила Кориолиса, сила градиента давления, сила трения ветра, трение на нижней границе плюма и боковое трение (рисунок 1.10). Суммируя эти силы, можно вычислить компоненты ускорения ( $a_x, a_y$ ), а затем и компоненты скорости ( $u, v$ ).

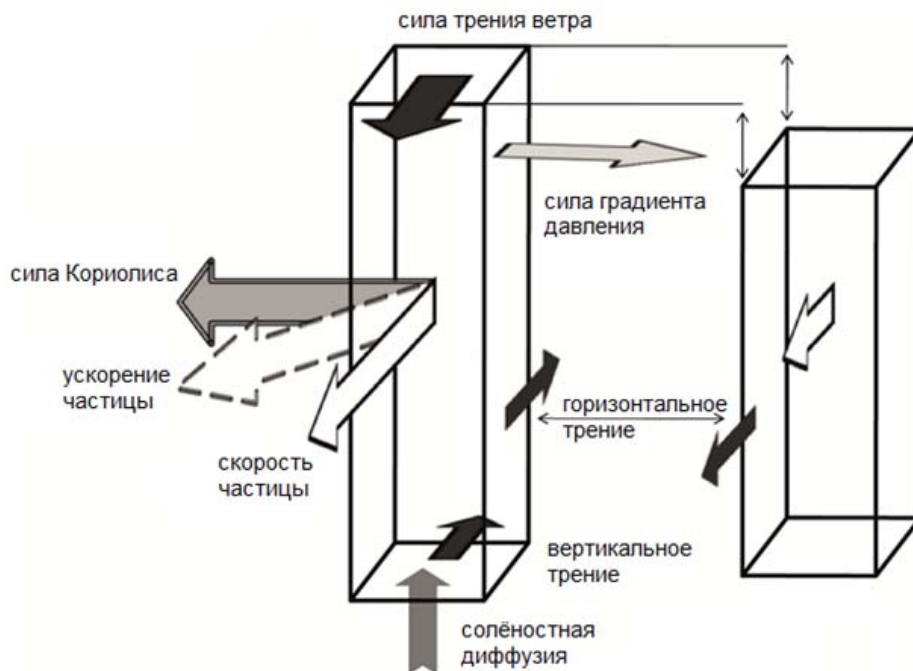


Рисунок 1.10 – Схема сил, воздействующих на индивидуальную частицу

Для вычисления пространственных производных, входящих в параметризацию некоторых из приложенных к частицам сил, в малой окрестности каждой частицы вводится вспомогательная горизонтальная сетка с соответствующими масштабами  $\Delta x$  и  $\Delta y$  в зональном и меридиональном направлениях. В узлах этих локальных сеток, расположение которых меняется с каждым шагом модели, значения скорости и толщины плюма вычисляются посредством интерполяции по значениям для всех частиц, попавших в некоторую окрестность узла. Таким образом, в отличие от фиксированной конечно-разностной сетки эйлеровых моделей, динамическая интерполяционная сетка меняется вместе с движением плюма, в результате чего, в частности, достигается лучшее разрешение в области высоких градиентов на границах плюма.

Стратификация плотности подавляет турбулентность и, соответственно, уменьшает коэффициенты вертикального трения и вертикальной диффузии как  $Rt^{-0.8}$ . Поведение частицы при непосредственном контакте с берегом определяется условием непротекания, т.е. компонента скорости, поперечная берегу, становится равной нулю, а вдольбереговая компонента не изменяется.



## 2 ПРОВЕДЕНИЕ ПАТЕНТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Оценка состояния морских экосистем и их важнейших абиотических и биотических компонентов в районах, представляющих наибольший пользовательский интерес, в подавляющем большинстве случаев основана на регистрации одного-двух физических, химических или биологических (промысловых) параметров. Это в большинстве случаев позволяет лишь быстро обнаруживать мощные загрязнения, утечку нефтепродуктов или токсикантов, иные хорошо видимые техногенные воздействия, а также одномоментно регистрировать аномальные биологические явления (вспышки видов-вселенцев и токсические «цветения» водорослей и микроорганизмов). При этом остается не решенной задача анализа и прогноза кратко- и долгосрочной реакции всего комплекса важнейших параметров региональных морских экосистем на существующие динамичные условия среды, включая антропогенные и климатические воздействия на акваториях.

Результаты патентных исследований показывают общую тенденцию к увеличению доли приборных способов регистрации различных параметров морских экосистем (физических, химических, биологических). Эти приборы и комплексы приборов обладают в той или иной степени автономностью либо дистанционным управлением и получением информации. В большей степени это относится к гидрофизическим характеристикам водной среды, но охватывает также и области гидрохимических и гидробиологических оценок состояния.

Наряду с развитием приборной базы экологических исследований и мониторинга, наблюдается тенденция в развитии и совершенствовании способов оценки и прогноза состояния различных компонентов морских экосистем. Для индикации воздействия антропогенных или природных факторов на экосистему и ее благополучие используются методы наблюдений (с помощью автоматических датчиков либо при регулярном пробоотборе) за состоянием и функционированием индикаторных параметров, показательно реагирующих на данные воздействия.

Анализ патентов, наиболее близких к теме ПНИ, показал следующее.

Патент на полезную модель RU90238U1 «Информационная система мониторинга окружающей среды и оповещения о локальных экологических нарушениях». Описываемая система включает в себя подвижные и стационарные объекты, центр обработки информации, датчики экологического состояния окружающей среды. Данная система ориентирована исключительно на сбор и фиксацию данных о состоянии только тех параметров экосистемы, которые могут быть проконтролированы соответствующим датчиками. В этом ограничение подобной информационной системы.

Патент RU2156958C1 «Способ определения и построения пространственного распределения океанографических характеристик и система для его реализации». Описываемый способ и система его реализации заключаются в том, что измерительные датчики и комплексные измерительные устройства производят комплексные контактные подспутниковые (судовые) измерения, по результатам которых корректируют спутниковые данные, по которым определяют и строят пространственные распределения океанографических характеристик. Данный способ и система ориентированы на контактные измерения в поверхностном слое морской среды и на борту судна, что в значительной мере усложняет и ограничивает возможности получения адекватных измерений состояния морской среды с учетом вертикального распределения в водной толще, а также влияния движения судна на измеряемые параметры. Данный способ не предусматривает эффективных прогностических оценок с использованием комплексных данных спутниковых и контактных долговременных измерений и результатов эко-гидродинамического моделирования.

Патент CN2013561260U «Ecological buoy monitoring system» («Плавающая система экологического мониторинга»). Данная система отслеживает параметры водной среды в реальном времени с высокой точностью и дискретностью, и передает данные через GPRS/CDMA/спутниковую связь. Функционирование данной системы не позволяет интегрировать данные дистанционных и контактных долговременных измерений.

Проведенные патентные исследования показали, что зарегистрированные системы оценки состояния и прогноза изменений морских экосистем крайне малочисленны и включают в себя ограниченный набор параметров. Комплексная оценка по гидрофизическим, гидрохимическим и гидробиологическим параметрам, определяемым методами контактных и дистанционных измерений, не входит в состав этих систем. Кроме того, включение в комплексную систему экологического мониторинга методики математического моделирования гидродинамики и прогноза распространения примесей (в том числе загрязняющих веществ) в зарегистрированных системах также не предусмотрено.

По результатам проведенных патентных исследований можно сделать следующие выводы. Зарегистрированные системы и способы проведения комплексных оценок состояния и прогноза изменений морских экосистем, основанные на сочетании трех подходов, включающих в себя долговременные натурные наблюдения, проводящиеся с использованием новейших технических методов и средств, анализа спутниковой информации и эко-гидродинамического численного моделирования отсутствуют. Существующие методы экспериментальных оценок негативного воздействия отдельных

наиболее важных в конкретных условиях факторов среды (в т.ч. химическое загрязнение) не охватывают все факторы, необходимые для учета при мониторинге морских, и в первую очередь прибрежных экосистем.

Завершенные патентные исследования соответствуют заданию на их проведение. Полученные данные достоверны, получены из официальных Баз данных по патентам (БД Федерального института промышленной собственности России, U.S. Patent & Trademark Office, European Patent Office). Поставленные перед патентными исследованиями задачи выполнены.

Проведенные патентные исследования показывают перспективность, с точки зрения получения патентоспособных результатов, планируемых к выполнению прикладных научных исследований по данному проекту.

Сформированы предложения по использованию результатов патентных исследований для совершенствования научно-технической продукции, планируемой к созданию в рамках проекта. Эти предложения заключаются в разработке автоматизированной системы экологического мониторинга шельфовой зоны Черного моря, основанной на интеграции результатов численного моделирования, контактных судовых и автономных наблюдений и спутниковых данных, которая обеспечит реализацию технологии непрерывного и репрезентативного экологического морского мониторинга в прибрежной зоне.

Отчет о патентных исследованиях представлен в составе отчетной документации в Приложении А.

### 3 ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

#### 3.1 Современные методы исследования и мониторинга морской среды

Бурный научно-технологический прогресс на протяжении последних двадцати лет произвел кардинальные изменения в методах исследования океана. Высокоточные дистанционные измерения с искусственных спутников земли (ИСЗ), ретранслируемые через ИСЗ наблюдения со свободно дрейфующих платформ и попутных судов позволяют осуществлять мониторинг текущего состояния океана в режиме реального времени. Измерения описывают широкий диапазон пространственно – временных масштабов, включая синоптические и мезомасштабные процессы. Современные модели циркуляции морей и океанов, основанные на физически полных уравнениях движения, способны адекватно качественно и количественно воспроизводить реальные процессы, рассчитывать начальное состояние гидрофизических полей с помощью ассимиляции данных натурных наблюдений.

В начале 90-х годов прошлого века, когда перспектива создания глобальной оперативной системы наблюдения за состоянием океана стала реальностью, началась разработка современных систем прогноза гидродинамики Мирового океана, аналогичных атмосферным прогнозам погоды. Также как и в метеорологии, адекватность морских оперативных прогнозов достигается посредством ассимиляции доступных наблюдений в моделях океанической циркуляции. Развитие интегрированных систем оперативных наблюдений и морских прогнозов является предметом оперативной океанографии – новой ветви океанологической науки.

Координация исследований в области оперативной океанографии осуществляется МОК ЮНЕСКО. Развитие мониторинга океана проводится в рамках проекта Global Ocean Observing System (GOOS). К настоящему времени совместными усилиями ведущих стран мира создана современная наблюдательная система, основанная на комбинации спутниковых и контактных наблюдений, выполняемых свободно дрейфующими ныряющими и всплывающими поплавками Арго и квази-лагранжевыми дрейфтерами верхнего слоя, позволяющая осуществлять оперативный мониторинг вертикальной структуры и циркуляции открытых и глубоководных районов океана.

Вместе с тем, квази-лагранжевые методы и средства оперативного мониторинга открытых и глубоководных частей океанов и морей плохо применимы к мониторингу прибрежной (шельфово-склоновой) зоны, где быстро изменяющаяся с расстоянием от берега глубина места и сложная топография создают препятствия и «ловушки» для свободно дрейфующих, ныряющих и всплывающих измерительных средств. Кроме того, поперечные берегу движения воды часто приводят к выходу дрейфующих станций из

прибрежной зоны в открытое море. Поэтому поддерживать систему лагранжевых измерителей в прибрежной зоне практически очень трудно и финансово обременительно.

По нашим представлениям, для регулярного мониторинга шельфово-склоновой зоны морей и океанов, главным образом, необходим эйлеров подход, заключающийся в размещении заякоренных измерительных платформ с оперативной передачей данных на подспутниковых полигонах. Такой подход позволяет осуществлять долговременное исследование морской среды с необходимым пространственно-временным разрешением. Его развитие и внедрение в область оперативной океанографии и комплексного мониторинга прибрежных зон является одной из основных задач данного проекта.

Основной задачей, выполненной участниками проекта за несколько последних лет являлось развертывание черноморского экспериментального подспутникового полигона в шельфово-склоновой зоне г. Геленджика и обеспечение его функционирования. Эта задача продолжает успешно выполняться. В 2013 - 2014 гг. на акватории полигона было развернуто 7 морских автономных станций на период времени постоянной работы от 3 до 6 месяцев. Для обеспечения полигона регулярной метеорологической информацией налажено получение данных метеостанции г. Геленджика. Хотя ядро полигона составляют автономные заякоренные и донные станции, осуществляющие квази-непрерывный мониторинг ключевых параметров водной толщи, полигон представляет собой многопрофильный комплекс, объединяющий в себе набор средств измерений, обработки, накопления и передачи данных, соответствующую им информационную инфраструктуру, комплекс технических средств обеспечения, включая судовые и стационарные средства, определенную производственную и бытовую инфраструктуру, здания и сооружения, финансовое обеспечение и т.д., а также людские и интеллектуальные ресурсы, архивы и банки данных, методики организации научно-экспериментальных работ и т.п.

Осуществляемая в рамках данного проекта апробация разрабатываемой технологии автоматизированного комплексного мониторинга прибрежной зоны с передачей информации в квази-реальном времени позволяет перейти на новый уровень исследования долговременной изменчивости параметров морской среды. Существующие методы измерения отдельных параметров морской среды (температура, уровень и др.) на единичных постах вдоль побережий России, в основном морально устарели, а средства измерения технически изношены, отстав от мирового уровня на 20-30 лет. На этом фоне особенно заметны усилия соседних стран по модернизации средств морского мониторинга в бассейне Черного моря в соответствии с 7-ой рамочной программой Европейского Союза. Развертывание черноморского гидрофизического полигона ИО РАН – автоматизированных измерительных платформ на шельфе г. Геленджика в комбинации с проведением

комплексных регулярных судовых исследований, анализом разнообразной спутниковой информации и математическим моделированием выдвигает нашу страну и отечественную океанологию на самый современный мировой уровень исследований.

Данное направление исследования имеет очень высокую степень оригинальности и новизны. В Черном море в настоящее время практически не проводится систематических совместных автоматизированных измерений метеорологических характеристик и параметров морской среды, и биоты в том числе, их вертикальных распределений в широком диапазоне временных масштабов (от нескольких часов до нескольких лет и даже десятилетий). Такого рода наблюдения необходимы для изучения закономерностей влияния атмосферных воздействий, климатических колебаний и антропогенного стресса на морскую экосистему. Следует отметить, что изучение климатических и антропогенных изменений возможно только на основе анализа долговременных и квазинепрерывных рядов данных. Экспедиционные судовые работы, имеющие эпизодический характер, не способны обеспечить получение таких рядов данных. На современном этапе гидрометеорологических наблюдений ставка делается на автоматические измерительные системы, устанавливаемые на длительные сроки, прежде всего в прибрежных (шельфово-склоновых) зонах морей и океанов. Такие измерения обладают регулярностью и однородностью, которые принципиально важны для методически корректной выборки данных о состоянии морских экосистем и их изменчивости под влиянием атмосферных воздействий, климатических изменений и антропогенного стресса.

Актуальной задачей, имеющей прикладное значение, является создание стационарных технических средств оперативного мониторинга морской среды от поверхности до дна в прибрежной (шельфово-склоновой) зоне морей России. Заякоренные автоматизированные системы наблюдения обладают меньшим риском потери, чем свободно дрейфующие, что облегчает выполнение их технического обслуживания, включая замену источников питания и профилактику измерительных датчиков. Размещение на подспутниковом полигоне таких систем, оснащенных широким набором датчиков, весьма целесообразно для решения ряда задач оборонного характера, а также биоокеанологии, гидрометеорологии, рыбной отрасли и охраны окружающей среды.

Развертывание полигона заякоренных автоматизированных технических средств, осуществленное при создании научного задела для реализации данного проекта, показало реальность и перспективность разрабатываемой технологии создания отечественных морских полигонов для проведения долговременных систематических наблюдений за состоянием морской среды на основе использования автоматизированных средств измерений с передачей данных в квази-реальном времени.

Подытоживая выше сказанное, сформулируем основное направление исследований, осуществляемое в данном проекте: оно заключается в развитии технологии мониторинга и прогнозирования экологического состояния водной среды морского шельфа на основе совокупного использования методов натуральных наблюдений (судовых и автономных), спутникового зондирования и численного моделирования с высоким пространственно-временным разрешением.

### **3.2 Разработка математических моделей Черного моря и распространения загрязняющих примесей**

Новизна научных подходов определяется сочетанием методов многокомпонентного расщепления, сопряженных уравнений и технологий расчета на сгущающихся сетках. Используемые в проекте оригинальные методы и алгоритмы развивают традиции научной школы Г.И. Марчука [18, 67, 68, 69].

Метод расщепления несет две основных нагрузки: во-первых, позволяет экономично решить задачу по времени, во-вторых – иерархически повысить полноту физического описания [69, 70]. Суть метода в представлении сложной модели в виде совокупности более простых моделей – вычислительных модулей. Модель можно упростить или физически обогатить, опуская или добавляя отдельные модули. Например, модель, описываемую системой примитивных уравнений, можно дополнить модулем, описывающим негидростатическую динамику [71]. Моделирование осуществляется с помощью физически полных прогностических моделей, разработанных в ИВМ РАН. Модели обладают высокой устойчивостью, позволяют использовать больший шаг по времени, по сравнению с известными моделями (MOM, NEMO).

Метод сопряженных уравнений является основой анализа сложных систем [72, 73]. Он значительно уменьшает размерность пространства решений в задаче оптимального подбора входных параметров модели для приближения ее решения к данным наблюдений. Однако при использовании метода возникает существенная трудность – необходимо строить и программно реализовывать сопряженную модель, уравнения которой имеют более сложный вид по сравнению с прямой прогностической системой. Если изменяется метод решения прогностической задачи, вид уравнений или их пространственная аппроксимация, то требуется изменить и сопряженный аналог модели. С технологической точки зрения – это весьма трудоемкая задача. Например, изменение программного кода европейской модели OPA/NEMO потребовало начать разработку новой системы 4-мерной вариационной ассимиляции данных NEMOVAR [74]. При нашем подходе сочетание двух методов – расщепления и сопряженных уравнений дает возможность более экономичного

решения задачи вариационной ассимиляции. Нам требуется строить сопряженный аналог к отдельному расщепленному модулю прямой модели. Полная модель набирается из соответствующих модулей прямых и сопряженных расщепленных задач. Подход упрощает построение сопряженной модели и вычисление градиента минимизируемого функционала, описывающего отклонение решения от данных наблюдений.

Моделирование процессов морской и океанской динамики на сгущающихся сетках позволяет воспроизвести особенности процессов в особых локальных подобластях, включая зоны штормовых нагонов и высокой турбулентной активности. Здесь можно использовать два подхода. Первый основан на расчетах на последовательности сеток, второй – на одной сетке со сгущением в выбранной подобласти [26, 75]. Именно второй метод будет применен в данном проекте при моделировании динамики вод Чёрного моря. Сгущение будет выполнено у побережья Геленджика в районе полигона ИО РАН.



#### 4 РАЗРАБОТКА РЕГИОНАЛЬНО АДАПТИРОВАННОГО АЛГОРИТМА ВОССТАНОВЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ХЛОРОФИЛЛА «а»

Алгоритмы восстановления концентрации хлорофилла «а» на основе спутниковых измерений яркости восходящего излучения базируются на особенностях спектрального хода коэффициента поглощения хлорофилла «а» и используют, как правило, отношения (индексы) нормированной яркости восходящего излучения в зелёной (555 нм), где поглощение минимально, и сине-жёлтой (440-480 нм) областях спектра. Примеры спектров поглощения пигментов клетки показаны на рисунке 4.1.

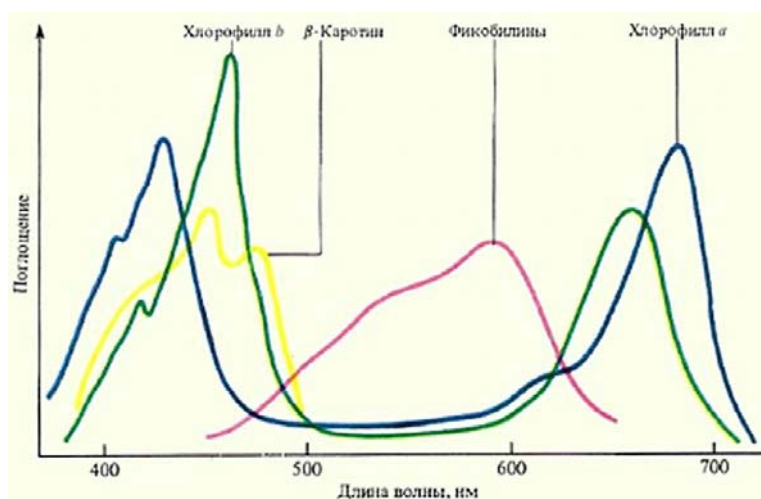


Рисунок 4.1 – Спектры поглощения пигментов фитопланктона

Эмпирическая связь этих индексов с концентрацией хлорофилла лежит в основе оперативных методов картирования концентрации хлорофилла «а». Типичный алгоритм расчёта концентрации хлорофилла «а» ( $C_a$ ) имеет следующий вид:

$$C_a = 10^{f(R)}$$

где  $f(R)$  – некоторая эмпирическая функция от упомянутых выше индексов.

Так для стандартного алгоритма ОСЗ для сканера MODIS функция имеет вид:

$$C_a = 10^{0.288 - 0.758R + 1.457R^2 + 0.659R^3 - 1.408R^4}, \quad (1)$$

где  $R = \log_{10}\left(\frac{R_{rs443} > R_{rs488}}{R_{rs551}}\right)$ .

Однако наличие других «цветных» пигментов в воде может приводить к достаточно большим ошибкам при использовании стандартных алгоритмов, учитывая, что в разных акваториях относительное содержание этих пигментов и хлорофилла «а» может существенно отличаться. Так для Чёрного моря спутниковые данные о концентрации хлорофилла, как правило, превышают измеренные значения.

Возможные подходы к разработке регионально адаптированных алгоритмов могут развиваться по нескольким направлениям:

1) простой поиск регрессионной связи стандартных значений  $C_a$  и измеренных значений в изучаемом районе и нахождение регрессионной связи типа для регионального алгоритма ( $C_{chl\_рег} = F(C_a)$ ), в простейшем случае

$$C_{chl\_рег} = A * C_a + B \quad (2).$$

2) нахождение оптимальной зависимости для  $f(R)$  с использованием имеющихся значений  $I_1$ ;

3) введение новых индексов в красной области спектра для расчёта оптимальных значений  $C_{chl\_рег}$ .

Для всех описанных способов необходим массив контактных измерений концентрации хлорофилла «а» в изучаемом районе. Для выполнения работ были использованы квазисинхронные со спутниковыми (MODIS Aqua) *in situ* данные, полученные сотрудниками ИОРАН и ИНБИОМ в прибрежных районах Черного моря. Проведено сопоставление предложенных алгоритмов, представлен анализ их преимуществ и недостатков. Рассчитаны поля концентрации хлорофилла по разным алгоритмам, сделаны численные оценки точности и отличий от стандартного алгоритма.

Для расчёта регрессионных коэффициентов по формуле (2) были использованы данные контактных измерений хлорофилла «а», полученные в ходе экспедиционных исследований ИО РАН в северо-восточной части моря в 2006-2014 годах.

На основе спутниковых данных сканера MODIS AQUA второго уровня, полученных из архива OceanColor GSFC, рассчитывались карты концентрации хлорофилла с максимальным пространственным разрешением (приблизительно 1.1x1.1км).

Пример такой карты представлен на рисунке 4.2. В облачных ситуациях над точкой измерений, выбирались возможные спутниковые данные на расстоянии не более 5 км.

Большинство данных было получено в прибрежной зоне. Учитывая значительную временную и пространственную изменчивость концентрации хлорофилла «а», для определения коэффициентов в региональных алгоритмах использованы только данные, полученные непосредственно в день пролёта спутника, т.е. временной интервал не превышал, как правило, 10-12 часов. Для контрольной выборки были использованы также данные, полученные с интервалом плюс-минус одни сутки. Карты положения отбора проб показаны на рисунке 4.3, соответственно для квазисинхронных данных и данных с интервалом до одного дня.

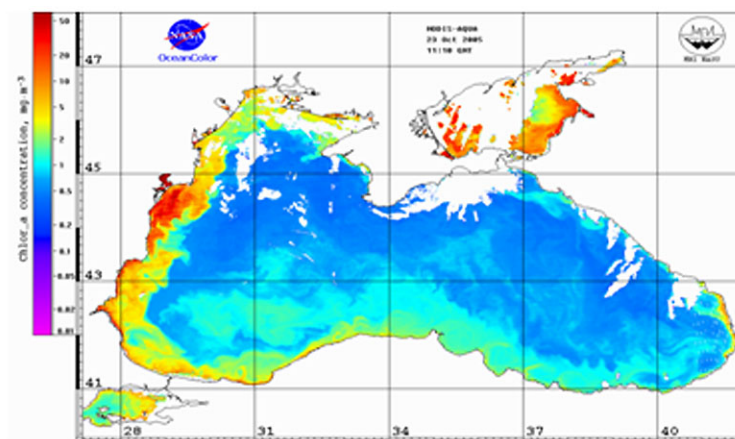


Рисунок 4.2 – Пример рассчитанной по стандартной методике ОСЗ карты концентрации хлорофилла «а». Белые участки соответствуют облачным зонам

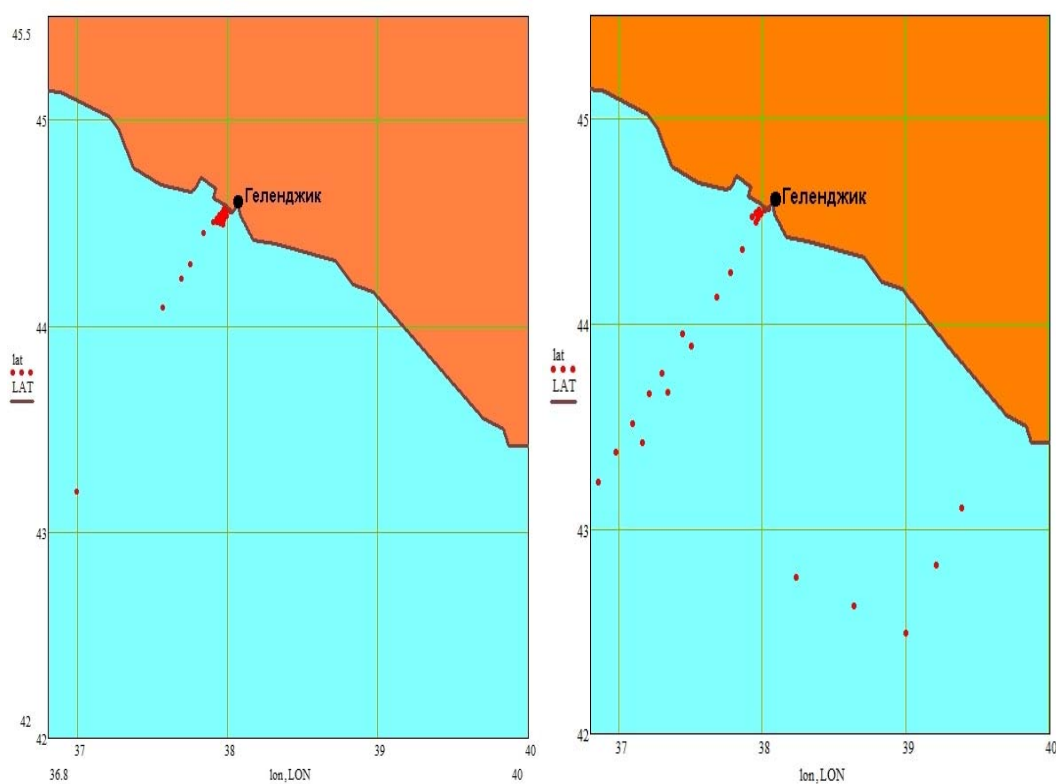


Рисунок 4.3 – Положение станций отбора проб, для расчёта регрессионных коэффициентов (а) и проверки соотношения на данных с рассогласованием до 24 часов (б)

Рассчитанные коэффициенты для пересчёта спутниковых значений хлорофилла «а», полученных по данным сканера MODIS AQUA, составили соответственно:

$$A=0.538, B= -0.03$$

и уравнение пересчёта имеет вид:

$$S_{хл\_рег} = 0.538 * C_a - 0.03 \quad (3)$$

Уравнение дает ошибку 0.083 мг/м<sup>3</sup> при коэффициенте корреляции 0.96.

Таблица использованных значений приведена ниже (таблица 4.1). На рисунке 4.4 представлены результаты сопоставления рассчитанных по спутниковым данным и измеренных значений хлорофилла «а».

Таблица 4.1 – Значения спутниковых параметров и концентрации хлорофилла «а» на подспутниковом полигоне

Дата	Lon	Lat	Chlor_a	Chlor_a_sat	Rrs_412	Rrs_443	Rrs_469	Rrs_488	Rrs_531	Rrs_547	Rrs_555	Rrs_645	Rrs_667	Rrs_678
25.05.2006	37.960	44.549	0.1100000	0.6594713	0.002870	0.006574	0.009260	0.010076	0.007942	0.006754	0.005854	-0.000104	-0.000346	-0.000384
25.05.2006	37.948	44.533	0.3000000	0.6209833	0.004962	0.008826	0.011288	0.012146	0.009326	0.007914	0.006730	0.000326	0.000100	0.000070
25.05.2006	37.948	44.522	0.2700000	0.5743453	0.005602	0.009558	0.012022	0.012876	0.009622	0.008080	0.006872	0.000256	0.000148	0.000118
25.05.2006	37.938	44.511	0.3300000	0.5344489	0.006192	0.010340	0.012952	0.013658	0.009888	0.008272	0.007042	0.000374	0.000216	0.000198
25.05.2006	37.922	44.500	0.3000000	0.5315743	0.006618	0.010794	0.013350	0.014010	0.010078	0.008462	0.007206	0.000624	0.000368	0.000334
25.05.2006	37.746	44.299	0.2300000	0.5737354	0.005912	0.009240	0.011362	0.011894	0.008820	0.007460	0.006380	0.000714	0.000578	0.000560
25.05.2006	37.685	44.228	0.1200000	0.5634161	0.005496	0.008642	0.010658	0.011156	0.008212	0.006936	0.005970	0.000750	0.000532	0.000516
25.05.2006	37.564	44.087	0.3400000	0.6051148	0.008532	0.012524	0.014998	0.015444	0.011598	0.009938	0.008564	0.001164	0.000882	0.000856
19.10.2007	37.970	44.565	1.1000000	1.8966610	0.000204	0.001468	0.002228	0.002758	0.003060	0.002842	0.002496	0.000160	-0.000108	-0.000036
19.10.2007	37.943	44.538	0.7270000	1.6091291	0.001098	0.002278	0.002830	0.003140	0.003246	0.003046	0.002756	0.000242	0.000176	0.000234
19.10.2007	37.902	44.505	0.6720000	1.2573278	0.001748	0.002610	0.003132	0.003204	0.003000	0.002828	0.002534	0.000378	0.000274	0.000296
13.09.2008	37.981	44.555	0.4700000	0.6550995	-0.001060	0.000594	0.000356	0.001176	0.001074	0.000786	0.000554	-0.001512	-0.001276	-0.001266
13.09.2008	37.967	44.538	0.7020000	0.6688429	0.000564	0.001788	0.001690	0.002246	0.001912	0.001516	0.001174	-0.000944	-0.000852	-0.000860
13.09.2008	37.967	44.490	0.4000000	0.5847660	0.001784	0.002734	0.002594	0.002864	0.002262	0.001812	0.001520	-0.000388	-0.000370	-0.000370
16.07.2008	37.977	44.552	0.4010000	0.5952402	0.000724	0.002846	0.003912	0.004588	0.003600	0.002928	0.002166	-0.002108	-0.002020	-0.002086
16.07.2008	37.958	44.537	0.3630000	0.5969087	0.003312	0.005244	0.006288	0.006646	0.005112	0.004248	0.003592	-0.000502	-0.000610	-0.000640
16.07.2008	37.921	44.515	0.3190000	0.5387735	0.004300	0.006338	0.007054	0.007422	0.005476	0.004514	0.003790	-0.000156	-0.000222	-0.000226
21.04.2008	36.990	43.197	0.4270000	0.6088845	0.000162	0.001766	0.002438	0.002610	0.002064	0.001684	0.001384	0.000216	0.000134	0.000164
21.04.2008	37.398	43.069	0.1770000	0.5167006	-0.000444	0.001162	0.001818	0.002008	0.001464	0.001196	0.000968	0.000238	0.000098	0.000106
21.04.2008	37.832	42.911	0.2990000	0.6003073	-0.000588	0.001182	0.002024	0.002320	0.001798	0.001488	0.001240	0.000322	0.000136	0.000190
01.10.2009	37.974	44.554	0.9840000	2.0135956	-0.000364	0.001308	0.002042	0.002694	0.003106	0.002834	0.002486	-0.000206	-0.000308	-0.000268
01.10.2009	37.961	44.550	1.0640000	2.1055474	-0.000136	0.001436	0.002008	0.002504	0.002902	0.002678	0.002424	-0.000192	-0.000266	-0.000230
01.10.2009	37.933	44.524	0.9970000	1.3214637	0.000538	0.001710	0.002132	0.002172	0.002138	0.001956	0.001832	0.000104	-0.000100	-0.000054
13.06.2013	37.924	44.522	0.1600000	0.4258111	0.006962	0.010776	0.012702	0.013026	0.008492	0.007016	0.006072	0.000404	0.000188	0.000134
13.06.2013	37.833	44.450	0.0900000	0.4475155	0.006710	0.010280	0.012054	0.012074	0.007950	0.006676	0.005812	0.000662	0.000424	0.000380
16.07.2013_1	37.950	44.495	0.0455870	0.3340894	0.001182	0.004034	0.005136	0.005074	0.003140	0.002388	0.001792	-0.000806	-0.001042	-0.001074
16.07.2013_2	37.987	44.530	0.1123060	0.2686301	0.000670	0.003342	0.003384	0.005056	0.002920	0.002090	0.001570	-0.001766	-0.001638	-0.001726
16.07.2013_2	37.970	44.515	0.1232560	0.2889693	0.001386	0.004040	0.004100	0.005532	0.003228	0.002392	0.001916	-0.001498	-0.001348	-0.001422
16.07.2013_2	37.950	44.495	0.0455870	0.3145157	0.002586	0.004764	0.004818	0.006190	0.003768	0.002812	0.002226	-0.000978	-0.000942	-0.000998
20.06.2013	38.073	44.564	0.4140000	0.5536116	-0.013313	-0.012751	-0.012383	-0.012074	-0.011853	-0.011880	-0.012056	-0.013402	-0.013351	-0.01336
20.06.2013	38.012	44.553	0.2010000	0.5376743	0.000084	0.002047	0.003207	0.003828	0.002325	0.001609	0.001041	-0.003072	-0.003209	-0.003148

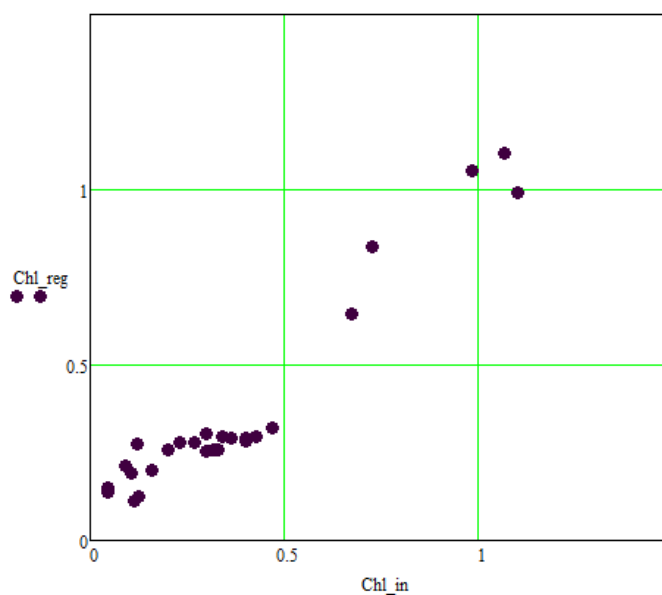


Рисунок 4.4 – Сопоставление рассчитанных и измеренных значений хлорофилла «а»

В общем случае коэффициенты в уравнении 3 не являются универсальными и зависят от свойств выборки. Для проверки достоверности были использованы данные с рассогласованием до 24 часов. Диаграмма рассеяния для двух массивов «квазисинхронного» и с интервалом до 24 часов между измерениями представлена на рисунке 4.5.

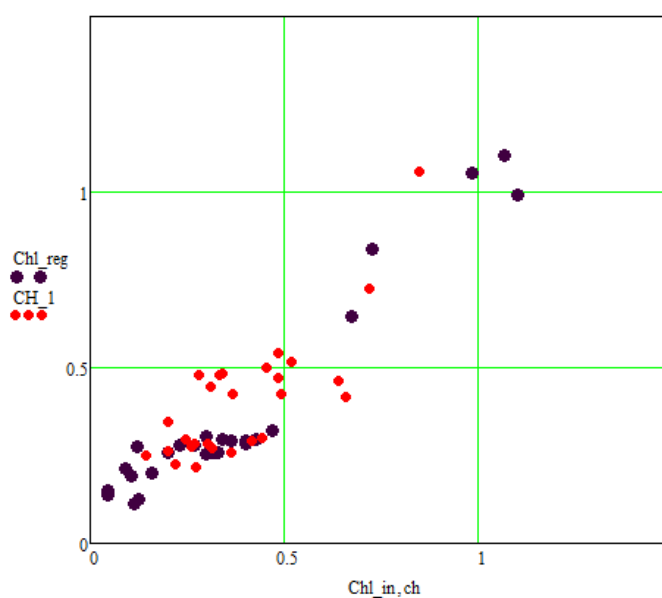


Рисунок 4.5 – Диаграмма рассеяния для двух массивов «квазисинхронного» (чёрные точки) и с интервалом до 24 часов между измерениями (красные точки)

Таблица использованных для проверки достоверности данных приведена ниже (таблица 4.2).

Таблица 4.2 – Исходные данные для проверки достоверности результатов расчетов концентрации хлорофилла «а» по уравнению (3).

Дата	Lon	Lat	Chlor_a	Chlor_a_sat	Rrs_412	Rrs_443	Rrs_469	Rrs_488	Rrs_531	Rrs_547	Rrs_555	Rrs_645	Rrs_667	Rrs_678
26(25).05.06	37.442	43.946	0.2700000	0.5831082	0.008042	0.011744	0.013986	0.014252	0.010578	0.009010	0.007806	0.001048	0.000812	0.000812
26(25).05.06	36.855	43.228	0.3100000	0.8855922	0.008242	0.011346	0.013796	0.014840	0.012840	0.011348	0.009950	0.001340	0.001028	0.001002
26(25).05.06	36.975	43.373	0.3400000	0.9508192	0.008546	0.011252	0.013564	0.014736	0.013068	0.011614	0.010088	0.001376	0.001124	0.001114
26(25).05.06	37.096	43.510	0.4900000	0.8459194	0.011860	0.015588	0.018310	0.019258	0.016302	0.014438	0.012736	0.001926	0.001412	0.001368
26(25).05.06	37.212	43.655	0.2600000	0.5660673	0.010332	0.014448	0.016858	0.017428	0.012716	0.010860	0.009350	0.001296	0.000952	0.000936
26(25).05.06	37.301	43.759	0.2000000	0.5462897	0.010348	0.014812	0.017234	0.017588	0.012678	0.010768	0.009316	0.001236	0.000962	0.000934
15(14).06.07	37.973	44.555	0.4530000	0.9847654	0.001164	0.004604	0.004912	0.006842	0.006148	0.005472	0.004448	-0.001448	-0.001330	-0.001368
15(14).06.07	37.956	44.541	0.2810000	0.9464228	0.000972	0.004484	0.005586	0.007194	0.006346	0.005658	0.004766	-0.001254	-0.001036	-0.001060
15(14).06.07	37.923	44.520	0.3650000	0.8482631	0.003822	0.006838	0.007360	0.008912	0.007534	0.006690	0.005718	-0.000318	-0.000286	-0.000322
22(21).04.08	38.231	42.764	0.2000000	0.6954231	-0.000482	0.001508	0.002166	0.002404	0.001894	0.001652	0.001318	0.000360	0.000192	0.000206
22(21).04.08	38.634	42.623	0.3030000	0.5798627	-0.001034	0.000850	0.001576	0.001894	0.001460	0.001194	0.001042	0.000170	0.000102	0.000136
22(21).04.08	39.209	42.825	0.2470000	0.6019843	-0.000920	0.000984	0.001986	0.002010	0.001580	0.001290	0.001136	0.000314	0.000080	0.000078
22(21).04.08	39.386	43.101	0.6590000	0.8314064	0.000110	0.002074	0.003032	0.003462	0.002936	0.002576	0.002204	0.000362	0.000232	0.000250
20(21).04.08	37.857	44.360	0.3330000	0.9468489	0.002552	0.003852	0.004548	0.004918	0.004326	0.003870	0.003264	0.000600	0.000396	0.000384
20(21).04.08	37.776	44.249	0.4420000	0.6105360	0.002344	0.003416	0.003916	0.004020	0.003056	0.002598	0.002274	0.000382	0.000224	0.000224
20(21).04.08	37.680	44.125	0.3120000	0.5590379	0.002220	0.003124	0.003622	0.003594	0.002626	0.002226	0.001874	0.000390	0.000234	0.000222
20(21).04.08	37.506	43.892	0.3610000	0.5331419	0.002284	0.003268	0.003754	0.003736	0.002734	0.002260	0.001980	0.000364	0.000228	0.000232
20(21).04.08	37.342	43.665	0.1440000	0.5188432	0.002064	0.002886	0.003322	0.003238	0.002316	0.001932	0.001784	0.000478	0.000216	0.000198
20(21).04.08	37.160	43.419	0.2180000	0.4760476	0.000576	0.001870	0.002232	0.002420	0.001696	0.001382	0.001086	0.000180	0.000094	0.000112
24(25).09.08	38.233	42.763	0.2730000	0.4592043	0.003194	0.003492	0.003302	0.003160	0.002444	0.001956	0.001608	0.000302	0.000238	0.000250
24(25).09.08	39.000	42.492	0.4140000	0.5960226	0.002452	0.002222	0.002158	0.001748	0.001068	0.000678	0.000486	0.000024	-0.000020	0.000000
06(07).10.13	37.950	44.495	0.6402850	0.9134520	0.004528	0.005130	0.005712	0.005954	0.005184	0.004614	0.004168	0.000798	0.000434	0.000442
09(10).04.14	38.041	44.560	0.8450000	2.0238214	0.001350	0.004428	0.006208	0.007800	0.008692	0.008222	0.007344	-0.000216	-0.001000	-0.000970
09(10).04.14	38.012	44.553	0.7170000	1.4006414	0.001624	0.004594	0.006368	0.007688	0.007728	0.007078	0.006144	0.000158	-0.000140	-0.000138
09(10).04.14	37.987	44.530	0.4840000	0.9343035	0.002748	0.005224	0.006604	0.007522	0.006682	0.005886	0.005246	0.000628	0.000330	0.000322
09(10).04.14	37.970	44.515	0.4830000	1.0594463	0.003648	0.005908	0.007340	0.008366	0.007620	0.006898	0.006124	0.000884	0.000544	0.000508
09(10).04.14	37.950	44.495	0.5190000	1.0136735	0.003574	0.005802	0.007146	0.008136	0.007396	0.006588	0.005880	0.000890	0.000532	0.000492

Как видно из рисунка 4.5, данные с однодневным рассогласованием достаточно хорошо соответствуют полученным ранее коэффициентам.

Использование индексов в красной области спектра и попытка непосредственно подобрать оптимальную форму для функции  $f(R)$  на данном массиве не дали улучшения точности восстановления концентрации хлорофилла «а».

Для оценки достоверности полученных результатов были привлечены данные полученные в работе [76]. Выбранный массив данных был получен сотрудниками Института Биологии Южных морей и использован ранее для сравнения с данными сканера SeaWiFS. На основании аналогичного сопоставления при рассогласовании данных до 24 часов было получено следующее соотношение для связи спутниковых и контактных данных

$$Chl\_a = Sat\_chl * 0.633 - 0.07,$$

где  $Chl\_a$  – расчётные значения, а  $Sat\_chl$  – данные сканера SeaWiFS.

Концентрация хлорофилла «а» по спутниковым данным сканера SeaWiFS рассчитывается по алгоритму OC4, отличающемуся от OC3, используемому для данных MODIS. Таким образом, для приведения к однородному массиву данные SeaWiFS должны

быть скорректированы. На основе среднемесячных значений для центральной части моря (глубина > 500 м) были получены регрессионные коэффициенты, связывающие значения SeaWiFS и MODIS. Диаграмма рассеяния для указанных данных за временной интервал 2003-2007 годы представлена на рисунке 4.6.

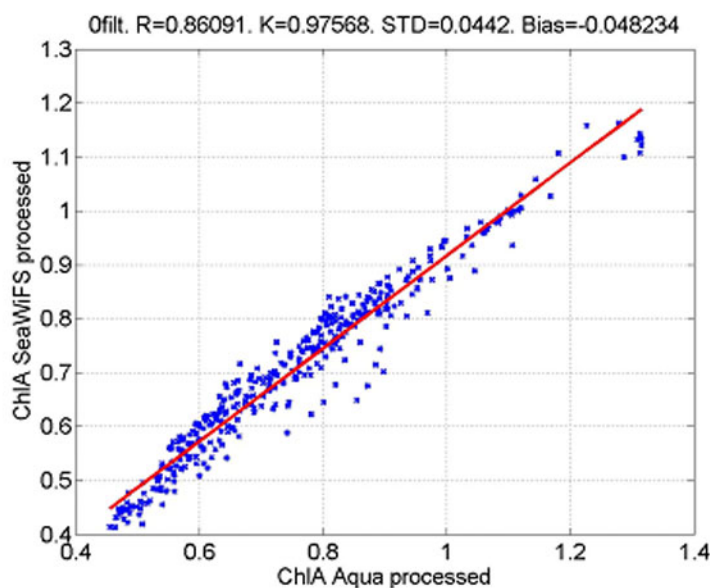


Рисунок 4.6 – Диаграмма рассеяния для осреднённых данных SeaWiFS и MODIS для глубоководной части моря

Полученные значения коэффициентов линейной регрессии – наклон 0.8609 и постоянный коэффициент -0.048 могут быть использованы для пересчёта данных SeaWiFS в имитированные данные сканера MODIS. Мы воспользовались массивом контактных наблюдений, полученным в работе [76] в 2000-2001 годах и данными сканера SeaWiFS с интервалом между пролётом спутника и временем отбора проб не более суток. Далее имитированные данные сканера MODIS были пересчитаны в концентрацию хлорофилла по формуле (3), нанесены на график вместе с ранее полученными результатами (рисунок 4.7).

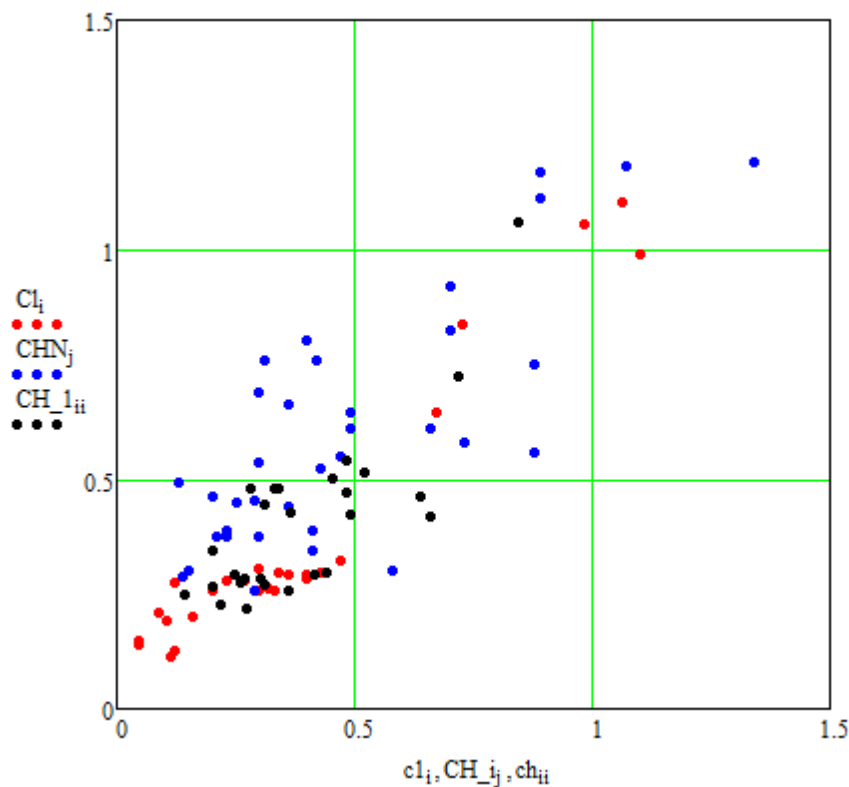


Рисунок 4.7 – Диаграмма рассеяния для двух массивов «квзисинхронного» (чёрные точки) и с интервалом до 24 часов между измерениями (красные точки) имитированного массива из данных SeaWiFS (синие точки)

Отметим, что коэффициенты линейной регрессии, полученные для имитированного массива SeaWiFS, близки к полученным для квзисинхронных данных MODIS:

0.545 и 0.538 - для наклона и -0.03 и -0.01 для свободного члена.

Полученные результаты позволяют предположить, что соотношение хлорофилла «а» и других цветных пигментов, определяющих точность восстановления концентрации хлорофилла «а» в водах с концентрацией до  $1.5 \text{ мг/м}^3$ , достаточно постоянно и для коррекции спутниковых данных можно использовать простое линейное уравнение пересчёта.



## 5 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ДВУХКАНАЛЬНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОГО СКАНЕРА TIRS

### 5.1 Спутниковые данные о температуре поверхности океана

Температура океана является одним из важнейших параметров, значительно влияющих на климат и состояние экосистемы. Спутниковые методы позволяют регулярно получать данные о температуре поверхности океана (ТПО) на всей акватории океана. К настоящему времени доступно уже более 30 лет измерений ТПО с различных спутников в микроволновом и инфракрасном диапазоне. Наиболее высокое доступное пространственное разрешение данных о ТПО до последнего времени составляло ~1 км и было получено по измерениям приборов MODIS и AVHRR в инфракрасном (ИК) диапазоне. Несмотря на то, что такое разрешение достаточно для решения, например, климатических задач, исследование многих процессов в океане требует получения информации на значительно меньших пространственных масштабах (например, апвеллингов, субмезомасштабных вихрей и др.). Эта информация особенно актуальна также для решения большинства прикладных задач региональной океанологии.

11 февраля 2013 года на орбиту Земли был выведен спутник Landsat 8. Он позволяет определять яркость излучения в дальнем ИК с разрешением 100 метров. Для измерений в дальнем ИК (тепловом канале) используется прибор: Thermal InfraRed Sensor (TIRS), характеристики которого даны в таблице 5.1. В сутки Landsat 8 позволяет получить порядка 400 изображений. Интервал повторения съемки над широтами Черного моря (40-45°N) составляет 16 дней. Сенсоры TIRS имеют более высокое отношение сигнал-шум по сравнению с предыдущими приборами, установленными на спутники серии Landsat.

Таблица 5.1 – Диапазоны работы прибора TIRS

Спектральный канал	Длины волн	Разрешение (размер 1 пикселя)
Канал 10 — Дальний	10.30 — 11.30 мкм	100 м
Канал 11 — Дальний ИК	11.50 — 12.50 мкм	100 м

Такого рода измерения дают возможность определять субмезомасштабную и мелкомасштабную тепловую структуру процессов в океане, что особенно важно для понимания динамики и энергетики различных процессов на этих масштабах. Примеры поля яркостной температуры, восстановленной по измерениям Landsat, приведены на рисунках 5.1 и 5.2.

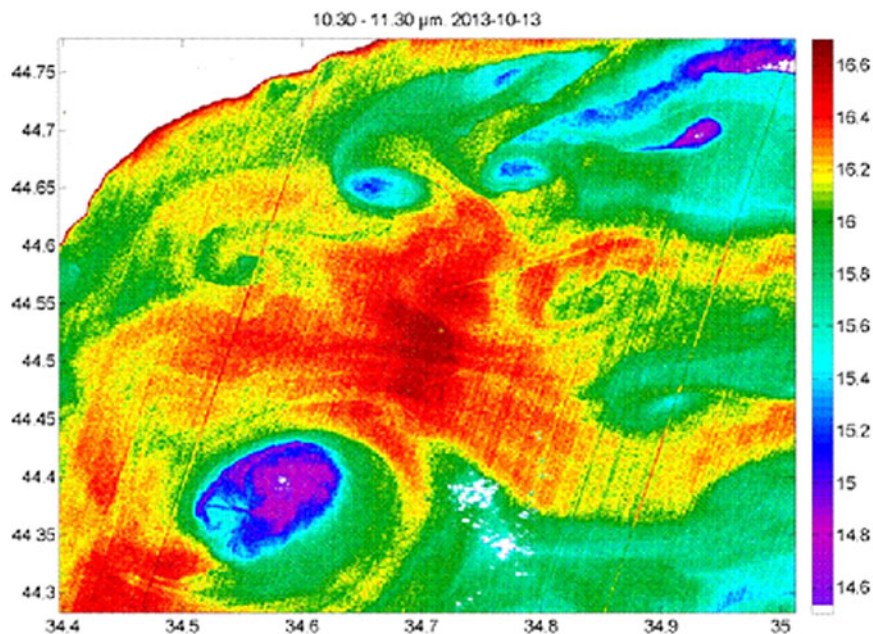


Рисунок 5.1 – Пример системы вихрей в поле яркостной температуры по измерениям Landsat-8 в канале 10

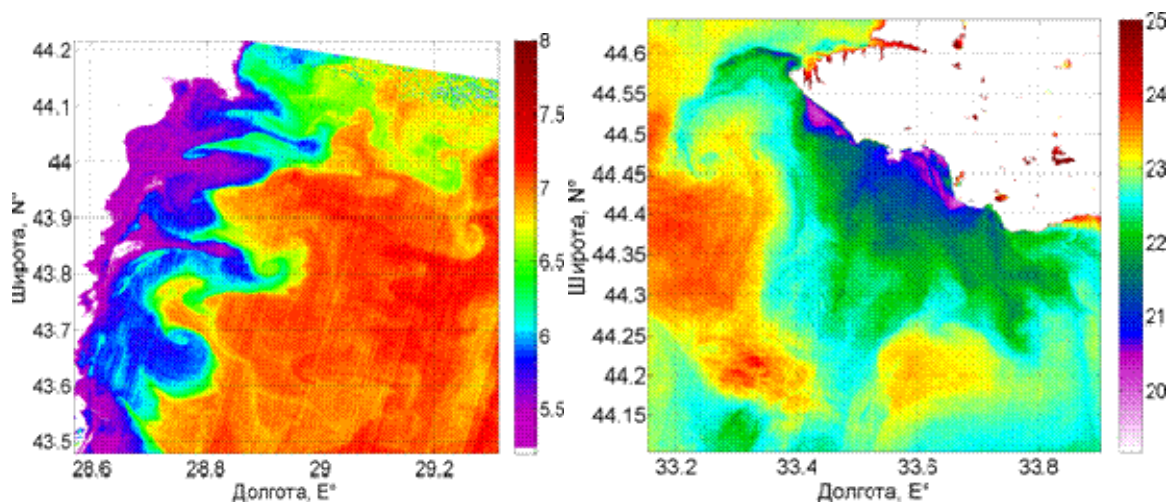


Рисунок 5.2 – Пример выноса холодных вод с берега (слева) 21 декабря 2013 года и пример летнего апвеллинга 1 августа 2013 года в полях яркостной температуры по измерениям Landsat-8 в канале 10

На первом примере видна система вихрей, состоящая из крупного циклона с ярко выраженным холодным ядром, крупного теплого антициклона и присоединенных к нему

мелких субмезомасштабных циклонов. По крайней мере 6 циклонов с радиусом порядка 1-2 километров видны на этом снимке. Такого рода мелкомасштабную структуру невозможно получить по данным MODIS с разрешением 1 км. Существование таких сложных вихревых структур дает дополнительную информацию о ряде важных процессов в море: диссипации, перемешиванию и т.д.

На рисунке 5.2 изображены два примера апвеллинга: первый наблюдается зимой на западном побережье Черного моря, второй летом на южном побережье Крыма. Видно, что на периферии апвеллинга развивается ряд субмезомасштабных особенностей: циклонических вихрей и филамент (радиуса и шириной порядка нескольких километров).

Однако данные LandSat позволяют определять только яркостную температуру поверхности, а не реальную температуру, необходимую для океанологических исследований. Наличие двух спектральных каналов измерений позволяет разработать алгоритм для восстановления температуры поверхности по измерениям LandSat 8. В настоящей работе проводится разработка двухканального алгоритма восстановления температуры по измерениям LandSat на основе использования калиброванных измерений ТПО спутника MODIS.

## 5.2 Обоснование двухспектрального метода восстановления ТПО

Сущность двухспектрального метода определения ТПО состоит в том, что излучательные характеристики атмосферы в двух каналах различны, а характеристики излучения поверхности океана одинаковы. Сигнал, принимаемый спутником, является суммой сигнала от океана (собственно температура) и от атмосферы (связанный с пропусканием атмосферы). Разница радиационной температуры  $T$  и температуры поверхности океана  $T_s$  может быть представлена в виде:

$$T_{\lambda}(z_0) - T_s = \int_0^{z_0} [T(z) - T_s] \cdot dP_{\lambda}(z; z_0) \quad , \text{ где } \lambda - \text{длина волны, } z_0 - \text{высота прибора, а } P(z;0) - \text{функция пропускания от } z \text{ до } 0.$$

Для случая приема радиометром излучения в двух спектральных интервалах и можно записать систему:

$$\begin{cases} \Delta T_{\lambda_1}(z_0) = \int_0^{z_0} \Delta T(z) \cdot dP_{\lambda_1}(z; z_0) \\ \Delta T_{\lambda_2}(z_0) = \int_0^{z_0} \Delta T(z) \cdot dP_{\lambda_2}(z; z_0) \end{cases}$$

В основу используемой модели закладывается предположение, что определяющую роль в ослаблении ИК-излучения в безоблачных условиях играет водяной пар. Тогда

коэффициенты поглощения в двух спектральных интервалах можно связать через константу  $k_1(z)=C \cdot k_2(z)$  и перейти от к системе:

$$\begin{cases} \Delta T_{\lambda_2}(z_0) = \int_0^{z_0} \Delta T(z) \cdot dP_{\lambda_2}(z; z_0) = F \\ \Delta T_{\lambda_1}(z_0) = \int_0^{z_0} \Delta T(z) \cdot P_{\lambda_1}^{C-1} \cdot C \cdot dP_{\lambda_1}(z; z_0) \end{cases}$$

Используя для упрощения вместо  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  индексы 1 и 2, запишем:

$$\begin{cases} \Delta T_1(z_0) = F \\ \Delta T_2(z_0) = C \cdot F \cdot \overline{P_1^{C-1}} = \gamma \cdot F \end{cases}$$

Где:

$$\overline{P_1^{C-1}} = \frac{\int_0^{z_0} \Delta T(z) \cdot P_1^{C-1} dP_1(z; z_0)}{\int_0^{z_0} \Delta T(z) dP_1(z; z_0)}$$

Таким образом, система может быть разрешена относительно  $T_S$ :

$$T_S = T_1 + \frac{\gamma}{1-\gamma} (T_1 - T_2)$$

Из уравнения видно, что коэффициент  $a = \frac{\gamma}{1-\gamma}$  не является константой и считать ее постоянной можно лишь с определенной степенью точности.

### 5.3 Методика восстановления ТПО по данным спутника LandSat

В настоящей работе для определения температуры по измерениям LandSat 8 предлагается использовать формулу:

$$T = T_{10} + a \cdot (T_{10} - T_{11}) + b$$

Для определения коэффициентов  $a$  и  $b$  в качестве температуры  $T$  используются калиброванные данные о температуре, полученные по измерениям прибора MODIS. Данные представляют собой продукты уровня обработки Level 2, полученные по измерениям спутника Aqua MODIS в инфракрасном диапазоне [77]. Ошибка определения ТПО по данным MODIS, оцененная на основе сопоставления с измерениями буев, составляет  $0.38^\circ\text{C}$  [78]. Данные о температуре морской поверхности MODIS были загружены из архива спутниковых данных МГИ (<http://dvs.net.us/>). Пространственное разрешение данных составляет 1.1 км. Спутник пролетает над акваторией Черного моря примерно в 11 часов UTC.

В работе использовались данные со спутников Landsat 8 за период с июня 2013 года по август 2014 года. Данные были получены с портала [glovis.usgs.gov](http://glovis.usgs.gov). Для определения радиационной температуры  $T_{10}$  и  $T_{11}$  по данным Landsat о спектральной яркости излучения была использована следующая формула:

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)}$$

где  $T$  – радиационная температура,  $k_1$  и  $k_2$  – известные константы,  $L_\lambda$  – яркость восходящего излучения. Для 10 канала константы  $k_1= 774.89$ ,  $k_2= 1321.08$ ; а для 11 канала  $k_1= 480.89$ ,  $k_2= 1201.14$ . Эти константы определяются из уравнения Планка.

Для разработки алгоритма восстановления температуры снимки спутника LandSat подбирались по двум критериям: отсутствию облачности и большой разностью показателей яркостной температуры на снимке.

Для определения констант  $\alpha$  и  $c$  в данном методе реальная температура  $T$  определяется по измерениям MODIS. Для этого использовались квазисинхронные снимки MODIS и Landsat. Всего было обработано 12 снимков (таблица 5.2).

Таблица 5.2 – Время получения изображений со спутников MODIS и Landsat

№	Дата	Время по Landsat	Время по Modis
1	9 июня 2013 года	08:15	11.00
2	11 июля 2013 года	08:15	11.00
3	25 июля 2013 года	08:28	11.15
4	1 августа 2013 года	08:34	11.20
5	10 августа 2013 года	08:28	11.15
6	20 октября 2013 года	08:34	11.20
7	28 ноября 2013 года	08:39	11.25
8	21 декабря 2013 года	08:46	11.30
9	4 февраля 2014 года	08:14	11.00
10	7 мая 2014 года	08:37	11.25
11	10 июня 2014 года	08:25	11.15
12	13 августа 2014 года	08:26	11.15

Данные о яркостной температуре Landsat осреднялись в ячейках 11\*11 для сопоставления с данными Modis.. После этого рассчитывалась разница между измерением Landsat в 10 канале и данными MODIS ( $T_{10} - T$ ), и разница между измерениями Landsat в 11 и 10 канале. Диаграмма рассеяния между этими двумя величинами ( $T_{10} - T$ ) и ( $T_{11} - T_{10}$ ) представлена на рисунке 5.3. Всего на диаграмме рассеяния представлено более 300000

измерений. Представленная зависимость была аппроксимирована линейной функцией. В результате были получены следующие коэффициенты

$$(T_{10} - T) = 0.81 * (T_{11} - T_{10}) - 1.9$$

Отсюда, температура по данным Landsat может быть рассчитана по следующей формуле

$$T_m = T_{10} + 0.81 * (T_{10} - T_{11}) + 1.9 \quad (1)$$

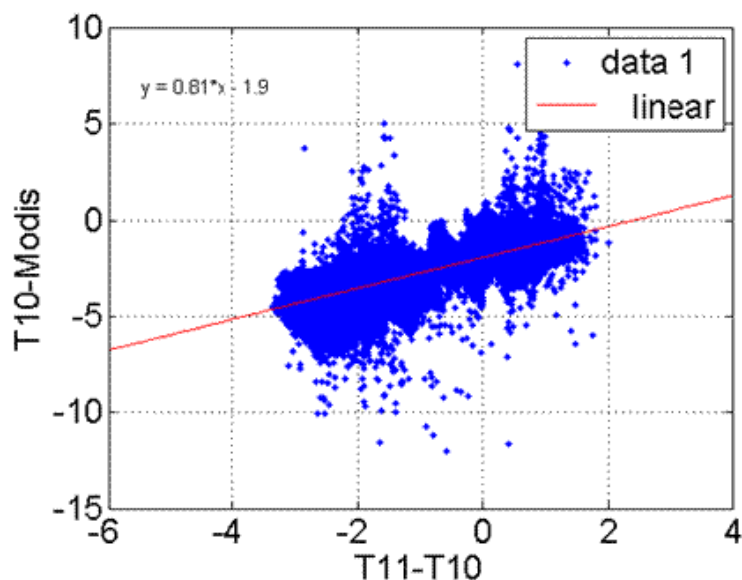


Рисунок 5.3 – Диаграмма рассеяния между  $(T - T_{10})$  и  $(T_{10} - T_{11})$

Таким образом, были определены константы  $a$  и  $b$ , которые соответственно равны  $+0,81$  и  $+1,9$ . Далее, используя полученную зависимость (1), была рассчитана температура по данным Landsat -  $T_m$ . После этого была построена диаграмма рассеяния между температурой, определенной по данным MODIS ( $T$ ) и по данным Landsat. (рисунок 5.3 - сверху). Видно, что эти величины хорошо коррелируют между собой. Тем не менее, аппроксимация линейной зависимостью показала, что найденные коэффициенты надо скорректировать.

$$T_{m2} = 1.1 * T_m - 0.88 = 1.1 * (T_{10} + 0.81 * (T_{10} - T_{11}) + 1.9) - 0.88 = 1.99 * T_{10} - 0.891 * T_{11} - 1.21 \quad (2)$$

Диаграмма рассеяния между  $T_{m2}$  и  $T$  представлена на рисунке 5.4. Для этих двух рядов были рассчитаны статистические характеристики: коэффициент регрессии между двумя величинами равен 1; коэффициент корреляции 0.99. Наиболее показательной величиной является стандартное отклонение  $\text{std}(T - T_{m2})$  оказалось равно  $0.58^\circ\text{C}$ .

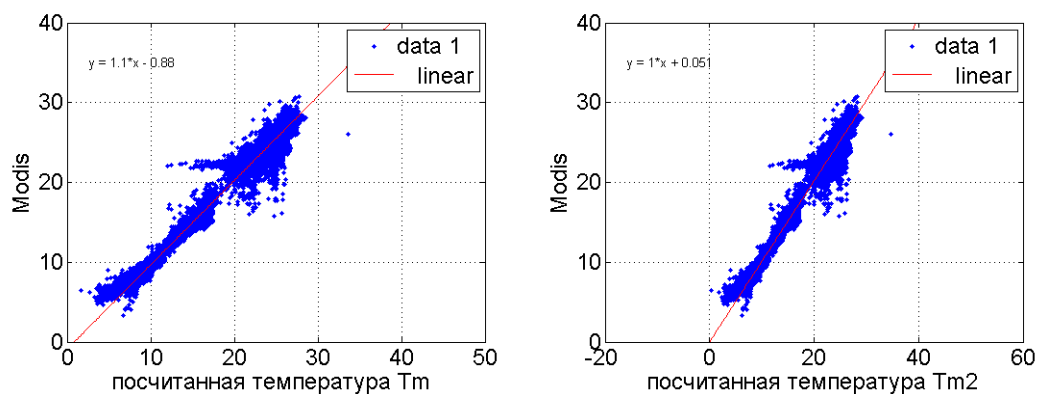


Рисунок 5.4 – Диаграммы рассеяния между T и Tm (слева); T и Tm2 (справа)

Для сравнения на рисунке 5.5 изображена диаграмма рассеяния между радиационной температурой LandSat в канале 10 ( $T_{10}$ ) и температурой MODIS (T). Несмотря на то, что коэффициент регрессии близок к 1, стандартное отклонение, гораздо выше, чем для рассчитанной по двум каналам температуры Tm2 и равно  $1.1^{\circ}\text{C}$ .

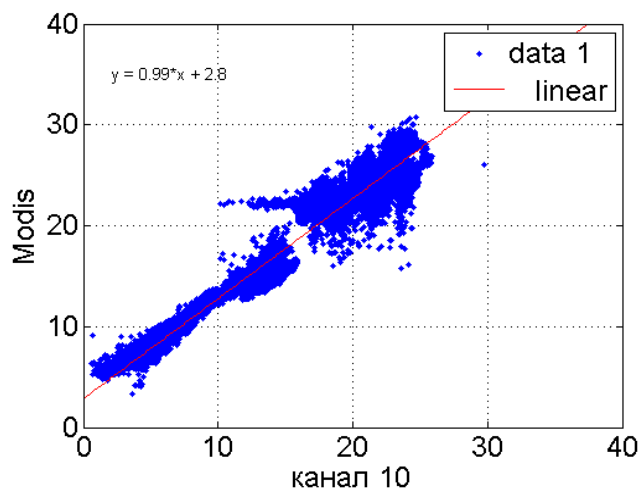


Рисунок 5.5 – Диаграммы рассеяния между T и  $T_{10}$

#### 5.4 Источники несоответствия температуры по MODIS и температуры, восстановленной по LandSat

На приведенных диаграммах (рисунок 5.6) видно, что разброс величин гораздо ниже в холодный период года ( $T < 20^\circ$ ), и выше в теплый период при температурах  $> 20^\circ$ . Статистические характеристики были рассчитаны для двух периодов отдельно.

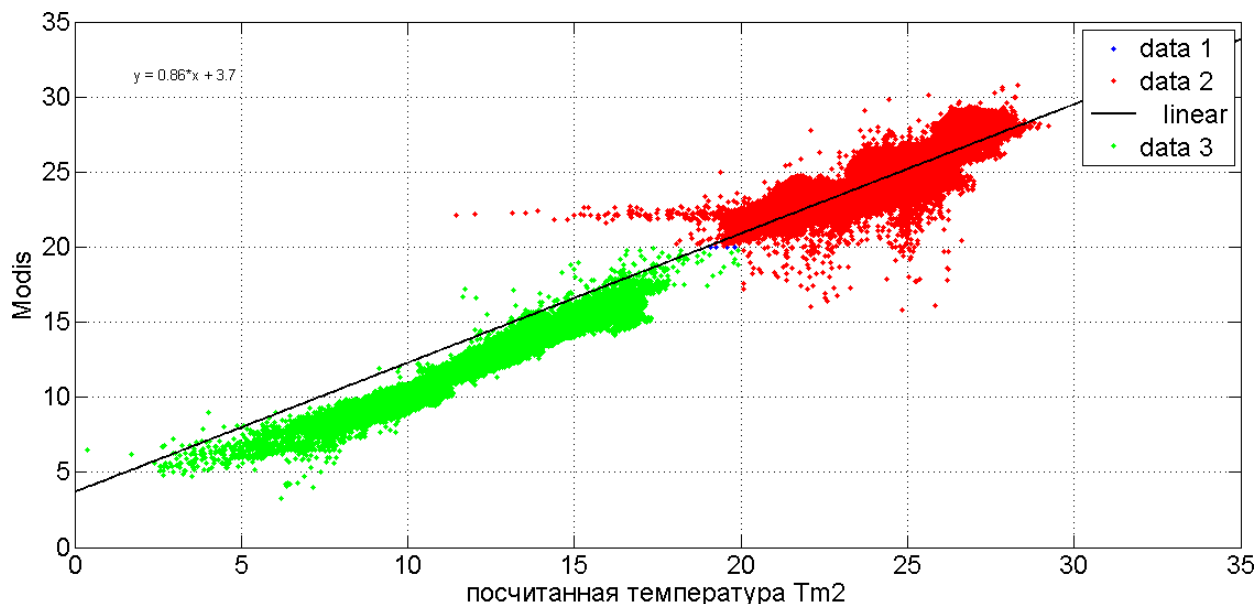


Рисунок 5.6 – Диаграммы рассеяния между T и Tm2 для теплого периода (красные точки), холодного периода (зеленые точки). Черной линией отложена регрессионная кривая для теплого периода

Для холодного периода стандартное отклонение равно  $0.48^\circ\text{C}$ , коэффициент корреляции 0.99; для теплого периода стандартное отклонение в два раза выше и равно  $0.81^\circ\text{C}$ , коэффициент корреляции 0.90 (рисунок 5.6). При этом на графике видно, что регрессионная кривая для теплого периода проходит заметно выше точек для холодного периода. Это значит, что температура MODIS в летний период систематически выше, чем температура, восстановленная по данным Landsat. Этот факт связан с различием во времени пролета спутников (см. таблицу 5.2): спутник MODIS пролетает над Черным морем примерно в 11 часов UTC, а LandSat в 8 часов UTC, что соответствует 14 и 11 часам местного времени. Таким образом, спутник MODIS измеряет температуру верхнего слоя в разгар дневного прогрева, а LandSat ранее. Это и приводит к значимым различиям на диаграмме рассеяния (рисунок 5.6). Для примера на рисунках 5.7 и 5.8 изображены карты MODIS, карты LandSat и их разницы за 13 августа и 10 июня 2014 года. Как видно, в это время на картах ТПО MODIS наблюдаются ярко выраженные зоны дневного прогрева. В обоих случаях возникновение этих зон было связано с штилевыми безветренными условиями. В первом случае зоны дневного прогрева покрывали почти весь бассейн и температура в них достигала  $30^\circ$ . Во втором случае наблюдается локальная зона дневного прогрева с температурой  $25^\circ$ , что на  $3-5^\circ$  выше по сравнению с температурой окружающих



вод. Разницы карт ТПО, полученных по данным LandSat и MODIS (рисунки 5.7 и 5.8) демонстрируют, что наибольшие различия (2-3°) действительно наблюдаются в зонах дневного прогрева и связаны с различием во времени измерений.

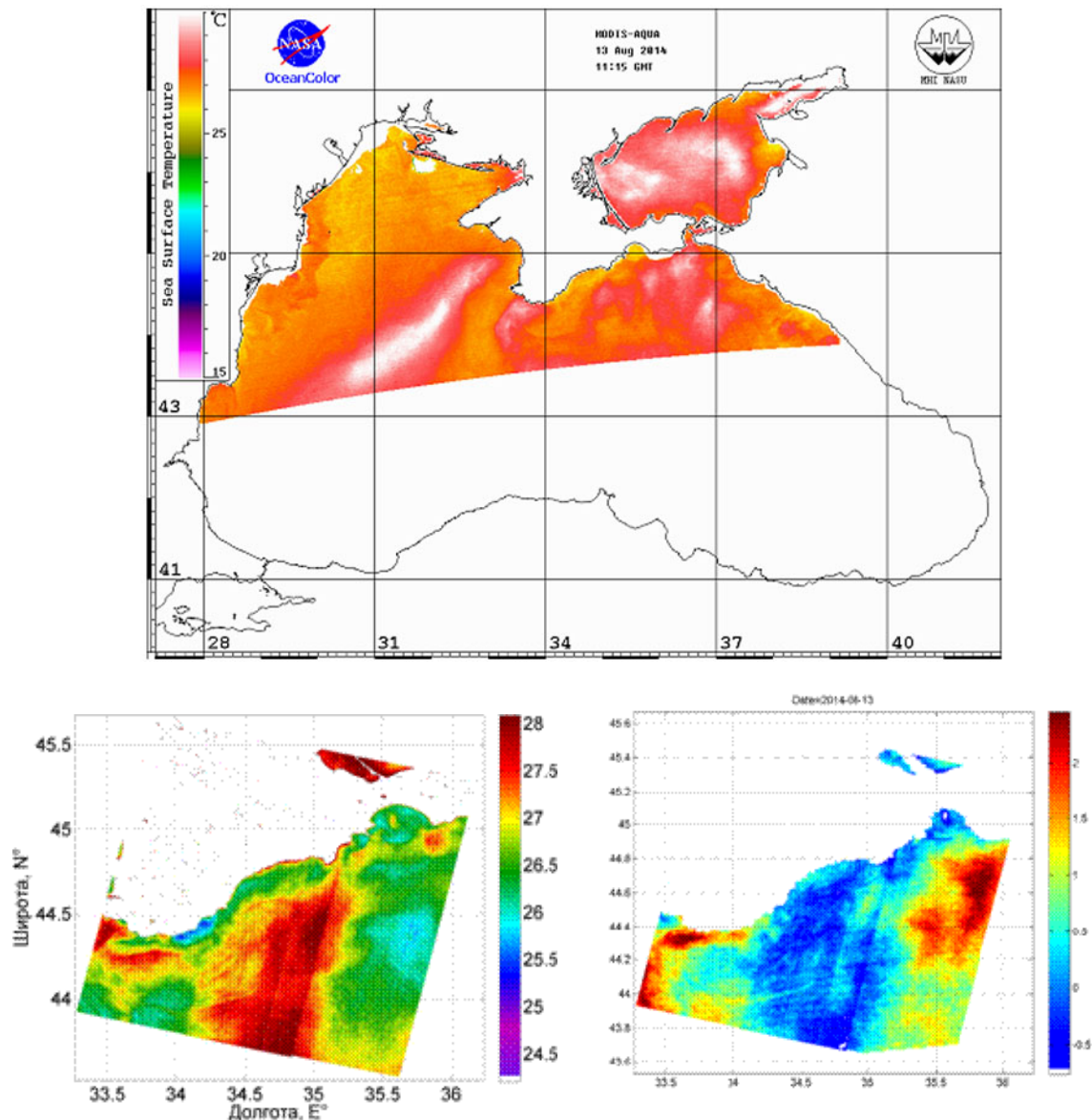


Рисунок 5.7 – температура поверхности моря за 13 августа 2014 года: по данным MODIS (11:00 UTC сверху); по данным LandSat (8:00 UTC снизу слева); и их разница (снизу справа)

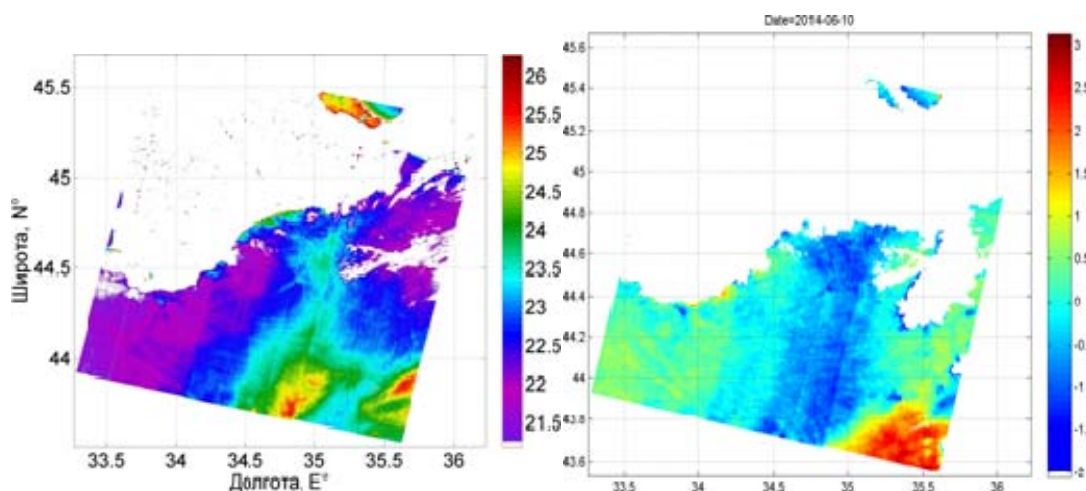
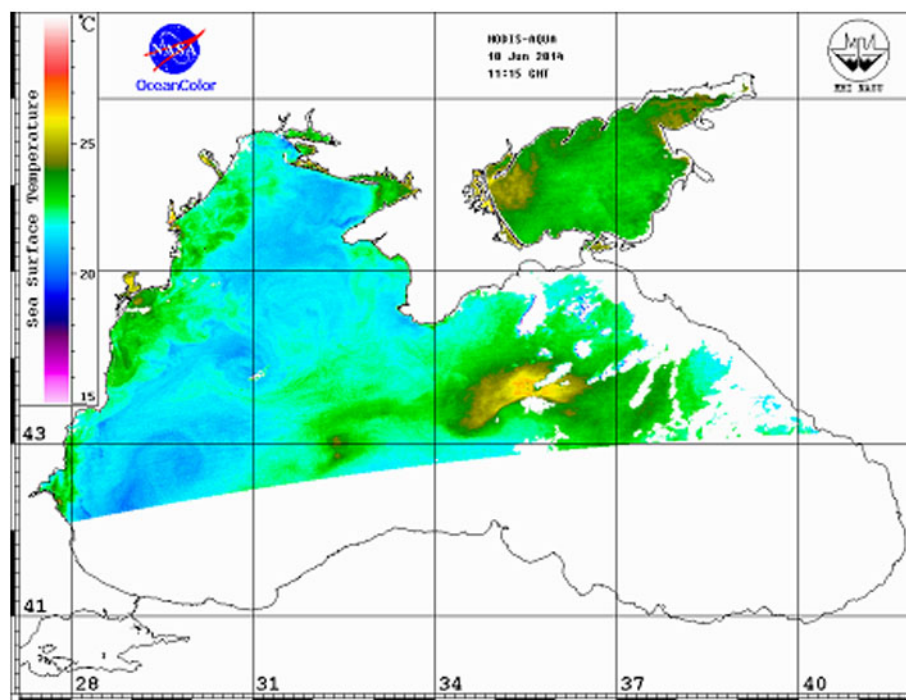


Рисунок 5.8 – температура поверхности моря за 10 июня 2014 года: по данным MODIS (11:00 UTC сверху); по данным LandSat (8:00 UTC снизу слева); и их разница (снизу справа)

Вторая вероятная причина возникающих ошибок связана с наличием специфических полос в данных LandSat. Одно изображение LandSat может состоять из трех зон, в которых яркостная температура отличается друг от друга на несколько десятых (см. пример на рисунке 5.9). Эти ошибки скорее всего связаны с инструментальными погрешностями прибора. При этом эти полосы могут возникать и пропадать на различных изображениях. Кроме того, они могут наблюдаться в одном канале (например канале 11) и не наблюдаться в другом (рисунок 5.10). Естественно, что эти полосы будут приводить к возникновению полос в восстановленной температуре и ошибкам по сравнению с температурой MODIS.

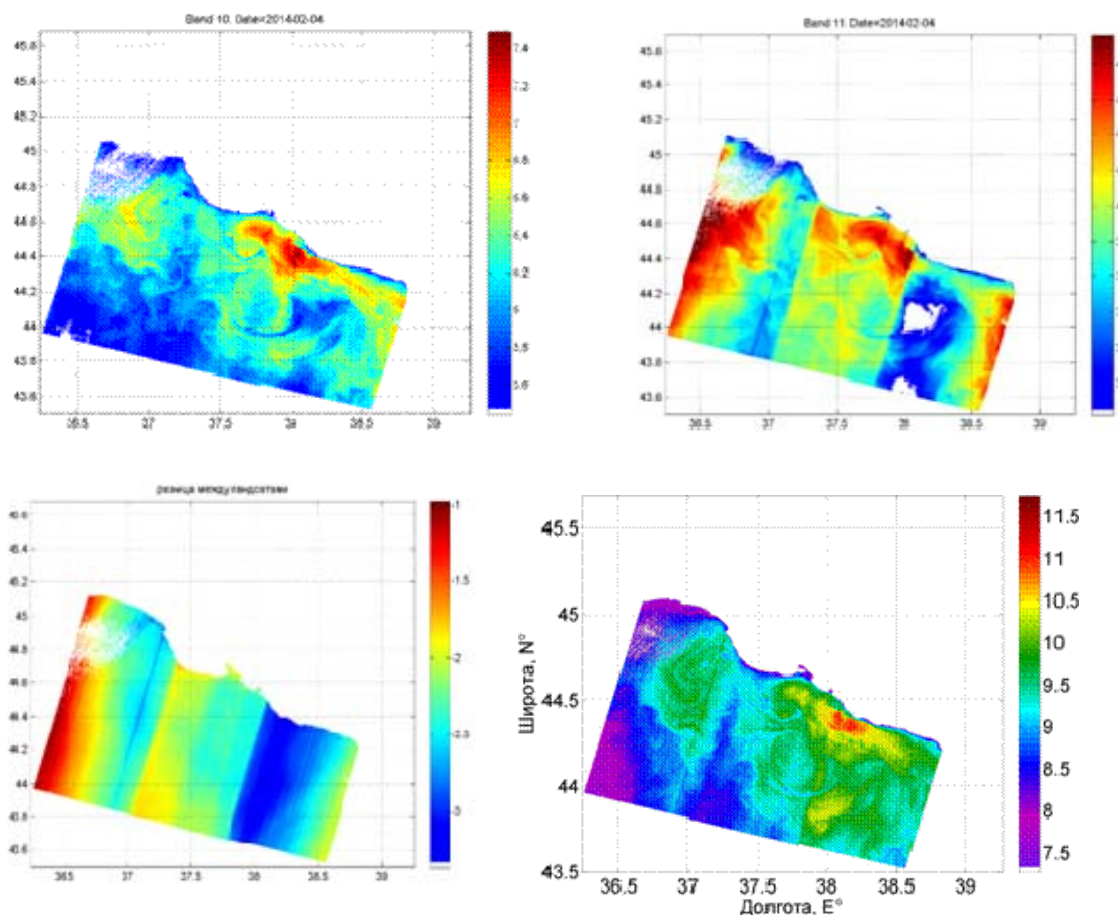


Рисунок 5.9 – Изображения поверхности моря со спутника Landsat: сверху – яркостная температура за 4 февраля 2014 года по каналу 10 (слева) и каналу 11 (справа); снизу – разница яркостных температур в канале 11 и канале 10 (слева) и восстановленная температура Tm2 (справа)

Еще один источник несоответствия связан с различным пространственным разрешением приборов: в зоне значительных градиентов температуры это различие может давать значительный вклад в стандартное отклонение. Тем не менее, отметим, что для большинства случаев разница Температуры по данным MODIS и температуры, полученной по данным Landsat, не превышает  $1^{\circ}$  по модулю. Два примера такого сопоставления приведены на рисунке 5.10 и 5.11. Представленные примеры демонстрируют, что поле температуры, полученное по данным Landsat, позволяет определить намного больше особенностей температурной структуры океана по сравнению с более грубыми данными MODIS.

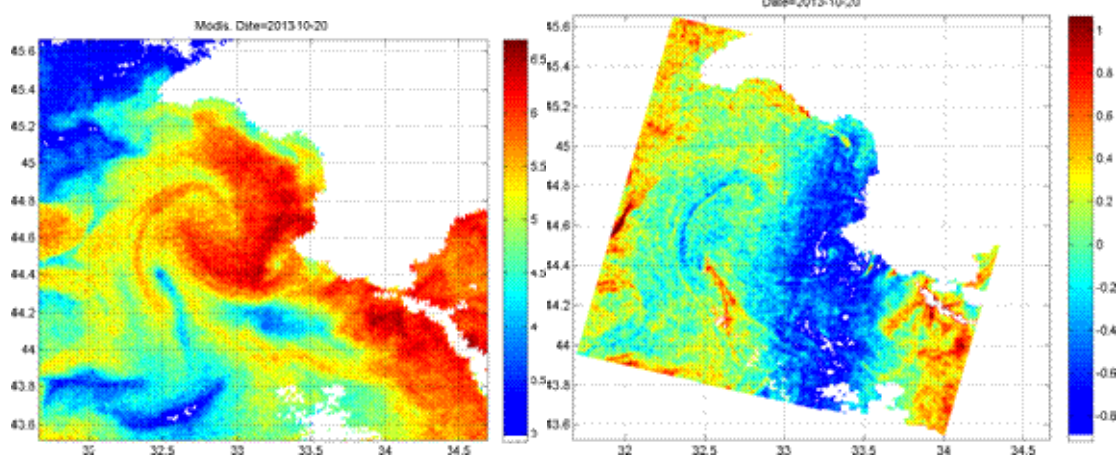
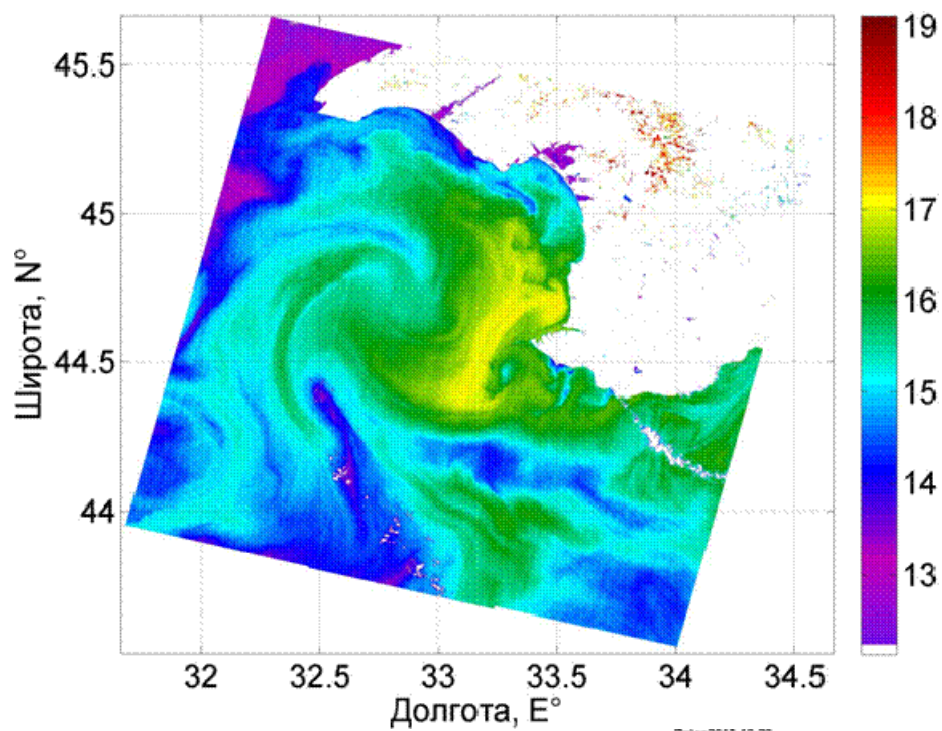


Рисунок 10 – Изображения поверхности моря со спутников Landsat и MODIS: сверху – температура  $T_{m2}$  по данным Landsat; снизу – температура  $T$  по данным MODIS (слева), разница между температурами ( $T - T_{m2}$ ) за 10 октября 2013 года (справа)

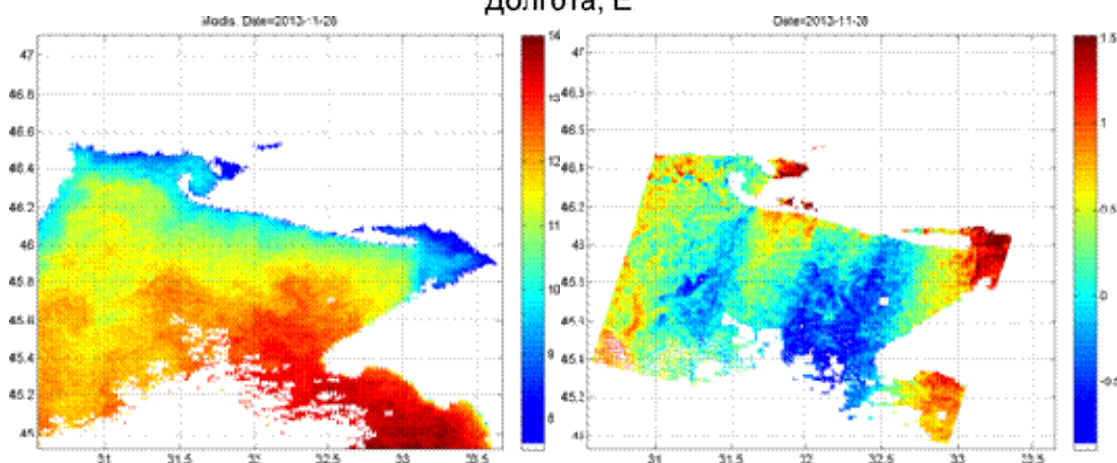
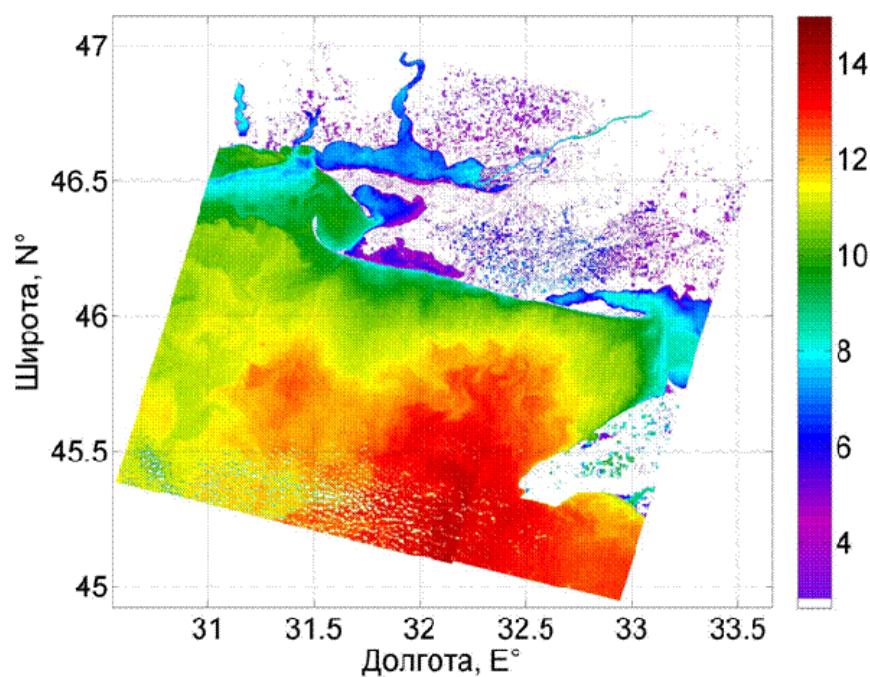


Рисунок 11 – Изображения поверхности моря со спутников Landsat и MODIS: сверху – температура  $T_{m2}$  по данным Landsat; снизу – температура  $T$  по данным MODIS (слева), разница между температурами ( $T - T_{m2}$ ) за 10 августа 2013 года (справа)

В работе на основе сопоставления с данными спутника MODIS разработана методика восстановления температуры по измерениям спутника Landsat-8. Представленная методика позволяет восстанавливать температуру поверхности с разрешением 100 метров, что дает возможность анализировать пространственную структуру различных явлений на поверхности океана на мелких масштабах (апвеллингов, субмезомасштабных вихрей и др.). Величина стандартного отклонения между восстановленной температурой и температурой, полученной по данным спутника MODIS, составила  $0.58^{\circ}\text{C}$ . При этом это различие меньше в холодный период года при температурах до  $20^{\circ}$  и составляет  $0.48^{\circ}\text{C}$ . В теплый период стандартное отклонение возрастает, что связано с различием во времени зондирования двух спутников, и возрастающей амплитудой суточного хода температуры. Следует учесть, что ошибка определения температуры по данным MODIS, рассчитанная на основе

сопоставления с измерениями океанографических буев, составляет  $0.38^{\circ}\text{C}$ . Поэтому дальнейшую отладку методики планируется провести на основе сопоставления с натурными измерениями температуры на подспутниковом полигоне.

## 6 РАЗРАБОТКА ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ВОД ЧЕРНОГО МОРЯ С УЛУЧШЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ У ПОБЕРЕЖЬЯ ГЕЛЕНДЖИКА В РАЙОНЕ ПОЛИГОНА ИО РАН

### 6.1 Описание модели

Рассматривается задача математического моделирования крупномасштабной динамики Чёрного моря. Численная модель морской циркуляции [26, 70] разработана в Институте вычислительной математики РАН. Развитие модели состоит в том, что уравнения морской гидродинамики записываются в сферической системе координат со сдвинутым северным полюсом. Полюс сдвигается в окрестность Геленджика для улучшения горизонтального разрешения в районе полигона ИОРАН. Модель основана на примитивных уравнениях, записанных в сферической  $\sigma$ -системе координат со свободной поверхностью, в приближениях гидростатики и Буссинеска. Модель включает процедуру оценки загрязнения выделенной акватории, основанную на расчете сопряженной задачи переноса пассивной примеси.

Алгоритм решения прямой и сопряженной задачи основан на методе многокомпонентного расщепления. Уравнения динамики моря и переноса пассивной примеси записываются в симметризованной форме. Пространственное разрешение модели изменяется от 150 метров в районе побережья Геленджика до 4.6 км в северо-западной части Чёрного моря. По вертикали используется 25 неравномерно распределенных по глубине  $\sigma$ -уровней.

### 6.2 Постановка задачи

Модель гидродинамики Чёрного моря является развитием модели общей циркуляции Мирового океана, разработанной в ИВМ РАН [69, 79]. Приведем краткое описание постановки задачи гидродинамики Чёрного моря и метода ее решения.

В качестве вертикальной координаты в модели используется безразмерная переменная  $\sigma \in [0,1]$ :

$$\sigma = \frac{z - \zeta}{H - \zeta},$$

где  $z$  – направленная вниз обычная вертикальная координата,  $H$  – глубина моря,  $\zeta$  – отклонение уровня моря от его невозмущенного состояния.

Модель основана на системе примитивных уравнений, записанных в системе координат тонкого сферического слоя с учетом приближений гидростатики и Буссинеска. Уравнения модели записываются в симметризованной форме и имеют следующий вид [69]:

$$D_t u - H(l + \xi)v = -\frac{H}{\rho_0 r_x} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( p - \frac{g}{2} Z \rho \right) - \frac{g}{2} \left( \rho \frac{\partial Z}{\partial x} - Z \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) \right] + \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial \sigma} v \frac{\partial u}{\partial \sigma} + D_u u, \quad (1)$$

$$D_t v + H(l + \xi)u = -\frac{H}{\rho_0 r_y} \left[ \frac{\partial}{\partial y} \left( p - \frac{g}{2} Z \rho \right) - \frac{g}{2} \left( \rho \frac{\partial Z}{\partial y} - Z \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) \right] + \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial \sigma} v \frac{\partial v}{\partial \sigma} + D_v v, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial \sigma} \left( p - \frac{g}{2} Z \rho \right) = \frac{g}{2} \left( \rho \frac{\partial Z}{\partial \sigma} - Z \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} \right), \quad (3)$$

$$-\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{r_x r_y} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (H r_y u) + \frac{\partial}{\partial y} (H r_x v) \right] + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = 0, \quad (4)$$

$$D_t T = \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial \sigma} v_T \frac{\partial T}{\partial \sigma} + D_T T + \frac{\partial R}{\partial \sigma}, \quad (5)$$

$$D_t S = \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial \sigma} v_S \frac{\partial S}{\partial \sigma} + D_S S, \quad (6)$$

$$\rho \equiv \rho(T, S, Z) = \tilde{\rho}(T + \bar{T}, S + \bar{S}, \rho_0 g Z) - \tilde{\rho}(\bar{T}, \bar{S}, \rho_0 g Z). \quad (7)$$

Здесь  $x$  – долгота,  $y$  – широта;  $r_x, r_y$  – метрические коэффициенты:  $r_x = R_E \cos y$ ,  $r_y = R_E$ ,  $R_E$  – радиус Земли;  $Z = H\sigma$ ,

$$l = 2\tilde{\Omega} \sin \varphi, \quad \xi = \frac{1}{r_x r_y} \left( \frac{\partial r_y}{\partial x} - \frac{\partial r_x}{\partial y} \right), \quad (8)$$

$l$  – параметр Кориолиса,  $\tilde{\Omega}$  – угловая скорость вращения Земли,  $\varphi$  – географическая широта.

$D_t$  – оператор переноса, записанный в симметризованной форме:

$$D_t \phi \equiv D_t(\bar{u})\phi = H \frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2r_x r_y} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (H r_y u \phi) + H r_y u \frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} (H r_x v \phi) + H r_x v \frac{\partial \phi}{\partial y} \right] + \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial}{\partial \sigma} (\omega \phi) + \omega \frac{\partial \phi}{\partial \sigma} \right], \quad (9)$$

$\bar{u} = (u, v, \omega)$  – вектор скорости в  $\sigma$ -системе координат,  $\omega$  – вертикальная скорость в  $\sigma$ -системе,  $w$  – вертикальная скорость в  $z$ -системе,

$$\omega = w - \left[ (1 - \sigma) \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{u}{r_x} \frac{\partial Z}{\partial x} + \frac{v}{r_y} \frac{\partial Z}{\partial y} \right], \quad (10)$$



$T$  – отклонение потенциальной температуры от среднего значения  $\bar{T}$ ,  $R$  – поток проникающей солнечной радиации,  $S$  – отклонение солёности от среднего значения  $\bar{S}$ ,  $\rho$  – отклонение плотности от некоторого профиля  $\bar{\rho} = \bar{\rho}(Z)$ ,  $\nu, \nu_T, \nu_S$  – коэффициенты вертикальной турбулентной вязкости и диффузии.

Для расчета коэффициентов вертикальной турбулентной вязкости и диффузии в модели можно использовать один из трех алгоритмов: параметризацию [80], параметризацию [81] или модель турбулентности  $(k-\omega)$  [82]. Для расчета отклонений плотности в (7) от устойчивого состояния используется уравнение состояния, учитывающее сжимаемость воды [83] (Brydon et al., 1999).

**Замечание 1.** При записи градиентов давления в квадратных скобках в (1), (2) и правой части уравнения гидростатики (3) использована симметризованная форма. Эта форма энергетически согласована с симметризованной (полудивергентной) формой оператора переноса  $D_i$ . Симметризованная форма оператора переноса позволяет расщепить его на три неотрицательных оператора по координатам  $x, y, \sigma$  и свести решение трехмерного уравнения переноса-диффузии к решению трех уравнений по отдельным координатам [68].

**Замечание 2.** Оператор боковой диффузии  $D_T, D_S$  второго порядка для тепла и соли в  $\sigma$ -системе координат представлен в форме, эквивалентной горизонтальной диффузии в обычной  $z$ -системе координат. Оператор выбирается одинаковым для  $T$  и  $S$  в (5) и (6) и выписывается в виде:

$$D\phi = \frac{1}{r_x r_y} \frac{\partial}{\partial x} \left[ K^x H \frac{r_y}{r_x} \left( \frac{\partial \phi}{\partial x} - \frac{\partial Z}{\partial \sigma} \frac{\partial \phi}{\partial \sigma} \right) \right] - \frac{1}{r_x r_y} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ K^x H \frac{r_y}{r_x} \frac{\partial Z}{\partial \sigma} \left( \frac{\partial \phi}{\partial x} - \frac{\partial Z}{\partial \sigma} \frac{\partial \phi}{\partial \sigma} \right) \right] + \quad (11)$$

где  $K^x(x, y, \sigma H)$  и  $K^y(x, y, \sigma H)$  – коэффициенты горизонтальной диффузии 2-го порядка вдоль  $x$  и  $y$ .

Оператор турбулентной вязкости  $D_u, D_v$  в (1), (2) представляет собой комбинацию операторов 2-го и 4-го порядков:

$$D_\phi \phi = H \operatorname{div}_h (A \operatorname{grad}_h) \phi - H \left( \operatorname{div}_h \left( B^{\frac{1}{2}} \operatorname{grad}_h \right) \right)^2 \phi \quad (12)$$

где  $\operatorname{grad}_h$  и  $\operatorname{div}_h$  – двумерные операторы градиента и дивергенции, действующие на поверхностях  $\sigma = \text{const}$ .  $A$  и  $B$  – диагональные тензоры второго порядка:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} A^x & 0 \\ 0 & A^y \end{pmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} B^x & 0 \\ 0 & B^y \end{pmatrix}, \quad (13)$$

где  $A^x = A^x(x, y)$ ,  $A^y = A^y(x, y)$ ,  $B^x = B^x(x, y)$  и  $B^y = B^y(x, y)$  – заданные функции.

**Граничные условия** для (1) – (7) следующие. На поверхности океана  $\sigma = 0$ :

$$\begin{aligned} -\frac{\nu}{H} \frac{\partial u}{\partial \sigma} &= \frac{\tau_x}{\rho_0}, \quad -\frac{\nu}{H} \frac{\partial v}{\partial \sigma} = \frac{\tau_y}{\rho_0}, \quad \omega = 0, \\ & \frac{1}{r_x^2} K^x H \frac{\partial Z / \partial x}{\partial Z / \partial \sigma} \left( \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\partial Z / \partial x}{\partial Z / \partial \sigma} \frac{\partial T}{\partial \sigma} \right) + \\ & + \frac{1}{r_y^2} K^y H \frac{\partial Z / \partial y}{\partial Z / \partial \sigma} \left( \frac{\partial T}{\partial y} - \frac{\partial Z / \partial y}{\partial Z / \partial \sigma} \frac{\partial T}{\partial \sigma} \right) - \frac{\nu_T}{H} \frac{\partial T}{\partial \sigma} + \alpha_T (T - T_{obs}) = q_T, \\ & \frac{1}{r_x^2} K^x H \frac{\partial Z / \partial x}{\partial Z / \partial \sigma} \left( \frac{\partial S}{\partial x} - \frac{\partial Z / \partial x}{\partial Z / \partial \sigma} \frac{\partial S}{\partial \sigma} \right) + \\ & + \frac{1}{r_y^2} K^y H \frac{\partial Z / \partial y}{\partial Z / \partial \sigma} \left( \frac{\partial S}{\partial y} - \frac{\partial Z / \partial y}{\partial Z / \partial \sigma} \frac{\partial S}{\partial \sigma} \right) - \frac{\nu_s}{H} \frac{\partial S}{\partial \sigma} + \alpha_s (S - S_{obs}) = q_s. \end{aligned} \quad (14)$$

Здесь  $\tau_x, \tau_y$  – компоненты напряжения трения ветра по координатам  $x, y$ ,  $\alpha_T, \alpha_s$  – заданные коэффициенты,  $q_T$  – нормированный поток тепла, учитывающий потоки явного и скрытого тепла, длинноволновую радиацию, часть коротковолновой радиации (ультрафиолет) и поток, вызванный наличием льда,  $q_s$  – нормированный поток солёности, учитывающий осадки, испарение, сток рек и образование/таяние льда.

На дне океана  $\sigma = 1$ :

$$\begin{aligned} \frac{\nu}{H} \frac{\partial u}{\partial \sigma} &= -C_D \sqrt{u^2 + v^2 + e_b^2} u, \quad \frac{\nu}{H} \frac{\partial v}{\partial \sigma} = -C_D \sqrt{u^2 + v^2 + e_b^2} v, \quad \omega = 0, \\ & -\frac{1}{r_x^2} K^x H \frac{\partial Z / \partial x}{\partial Z / \partial \sigma} \left( \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\partial Z / \partial x}{\partial Z / \partial \sigma} \frac{\partial T}{\partial \sigma} \right) - \\ & - \frac{1}{r_y^2} K^y H \frac{\partial Z / \partial y}{\partial Z / \partial \sigma} \left( \frac{\partial T}{\partial y} - \frac{\partial Z / \partial y}{\partial Z / \partial \sigma} \frac{\partial T}{\partial \sigma} \right) + \frac{\nu_T}{H} \frac{\partial T}{\partial \sigma} = 0, \\ & -\frac{1}{r_x^2} K^x H \frac{\partial Z / \partial x}{\partial Z / \partial \sigma} \left( \frac{\partial S}{\partial x} - \frac{\partial Z / \partial x}{\partial Z / \partial \sigma} \frac{\partial S}{\partial \sigma} \right) - \\ & - \frac{1}{r_y^2} K^y H \frac{\partial Z / \partial y}{\partial Z / \partial \sigma} \left( \frac{\partial S}{\partial y} - \frac{\partial Z / \partial y}{\partial Z / \partial \sigma} \frac{\partial S}{\partial \sigma} \right) + \frac{\nu_s}{H} \frac{\partial S}{\partial \sigma} = 0, \end{aligned} \quad (15)$$

где  $C_D = 2.5 \cdot 10^{-3}$ ,  $e_b = 5$  см/с – эмпирические константы.

На боковой поверхности для скорости задаются условия непротекания и свободного скольжения. На твердых участках боковой границы потоки тепла и соли равны нулю. На

жидких участках боковой границы задаются скорости, температура и соленость, взятые из наблюдений.

В модель циркуляции Чёрного моря включен модуль расчёта морского льда [84-86].

### 6.3 Численный алгоритм

Численный алгоритм решения задачи основан на методе многокомпонентного расщепления [87]. Запись уравнений (1)–(7) в симметризованной форме позволяет использовать алгоритм расщепления по физическим процессам и по отдельным пространственным координатам  $x, y, \sigma$  [73]. Полный алгоритм решения задачи на интервале  $t^j < t < t^{j+1}$  имеет следующую структуру. Линеаризуем операторы переноса для функций  $u, v, T, S$  и расцепим уравнения (1)–(7) по физическим процессам на два макро-этапа: перенос-диффузию  $u, v, T, S$  и адаптацию полей течений и плотности.

На этапе переноса-диффузии имеем

$$\begin{aligned}
 D_t(\bar{u}^j)u - H\xi^j v &= \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial \sigma} v \frac{\partial u}{\partial \sigma} + D_u u, \\
 D_t(\bar{u}^j)v + H\xi^j u &= \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial \sigma} v \frac{\partial v}{\partial \sigma} + D_u v, \\
 D_t(\bar{u}^j)T &= \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial \sigma} v_T \frac{\partial T}{\partial \sigma} + D_T T + \frac{\partial R}{\partial \sigma}, \\
 D_t(\bar{u}^j)S &= \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial \sigma} v_S \frac{\partial S}{\partial \sigma} + D_S S.
 \end{aligned} \tag{16}$$

Внутри этапа переноса-диффузии производится повторное расщепление по отдельным координатам  $x, y, \sigma$ .

На этапе адаптации полей течений и плотности имеем

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial u}{\partial t} - l v &= -\frac{1}{\rho_0 r_x} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( p - \frac{g}{2} Z \rho \right) - \frac{g}{2} \left( \rho \frac{\partial Z}{\partial x} - Z \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) \right], \\
 \frac{\partial v}{\partial t} + l u &= -\frac{1}{\rho_0 r_y} \left[ \frac{\partial}{\partial y} \left( p - \frac{g}{2} Z \rho \right) - \frac{g}{2} \left( \rho \frac{\partial Z}{\partial y} - Z \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) \right], \\
 \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( p - \frac{g}{2} Z \rho \right) &= \frac{g}{2} \left( \rho \frac{\partial Z}{\partial \sigma} - Z \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} \right), \\
 -\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{r_x r_y} &\left[ \frac{\partial}{\partial x} (H r_y u) + \frac{\partial}{\partial y} (H r_x v) \right] + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = 0, \\
 \frac{\partial T}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial t} = 0, \quad \rho &= \rho(T, S, Z).
 \end{aligned} \tag{17}$$

Для решения уравнений адаптации используется представление

$$u = \bar{u} + u', \quad v = \bar{v} + v', \quad \bar{u} = \int_0^1 u d\sigma, \quad \bar{v} = \int_0^1 v d\sigma \quad (18)$$

и выделяется расчет средних скоростей по вертикали  $\bar{u}, \bar{v}$ . Пространственная аппроксимация расщепленных задач производится на сетке, известной в метеорологической литературе как сетка C [88].

Опишем основную структуру алгоритма численного решения на интервале  $t^j < t < t^{j+1}$ .

Перед решением системы уравнений (1)–(7) производятся вспомогательные расчеты, связанные с вычислением атмосферного форсинга и характеристик морского льда. Модуль расчета морского льда включает локально-одномерную модель термодинамики и динамики [84-86].

Расчет потоков тепла, соли и импульса в океан производится с использованием атмосферных данных и рассчитанных характеристик морского льда.

В процессе расщепления (1)–(7) выделяются два основных этапа: перенос-диффузия  $T, S, u, v$  и адаптация полей течений и плотности.

Первый этап далее расщепляется на перенос-диффузию по отдельным координатам  $x, y, \sigma$ . Мы используем аппроксимацию Кранка-Николсон для переноса субстанций и неявную – для диффузии и вязкости второго порядка.

Адаптация полей течений и плотности рассчитывается следующим образом: расчет плотности по уравнению (7); расчет давления по полю плотности; расчет бароклинных компонентов скорости  $u', v'$  и вертикальной скорости  $\omega$ ; расчет баротропных (осредненных по вертикали) компонентов скорости  $\bar{u}, \bar{v}$  и уровня моря  $\zeta$ . Для нахождения решения системы уравнений баротропной динамики  $\bar{u}, \bar{v}, \zeta$  используется неявная итерационная схема.

#### **6.4 Оценка загрязнения моря с помощью метода сопряжённых уравнений**

Рассмотрим задачу оценки загрязнения некоторой морской подобласти пассивной примесью. Эту задачу можно свести к задаче расчёта функции чувствительности для трёхмерного уравнения переноса-диффузии пассивной примеси, используя метод сопряжённых уравнений. Предположим, что задача расчёта морских течений решена, и трёхмерное поле бездивергентной скорости построено. Предположим также, что пассивная примесь, источник которой находится на поверхности моря, распространяется этой скоростью, и отсутствует поглощение внутри области.

В этом случае, процесс загрязнения морского бассейна  $D$  описывается уравнением переноса-диффузии пассивной примеси  $\varphi$ :

$$\begin{aligned}
 & H \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{r_x r_y} \frac{\partial}{\partial x} (H r_y u \varphi) + \frac{H u}{r_x} \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \frac{1}{r_x r_y} \frac{\partial}{\partial y} (H r_x v \varphi) + \frac{H v}{r_y} \frac{\partial \varphi}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial \sigma} (\omega \varphi) + \omega \frac{\partial \varphi}{\partial \sigma} \right] - \\
 & - \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial \sigma} v \frac{\partial \varphi}{\partial \sigma} - D_\varphi \varphi = 0 \\
 & v \frac{\partial \varphi}{\partial \sigma} = Q, \quad \sigma = 0, \\
 & v \frac{\partial \varphi}{\partial \sigma} = 0, \quad \sigma = 1, \\
 & \frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0, \quad \partial D, \\
 & \varphi = \varphi^0, \quad t = 0.
 \end{aligned} \tag{19}$$

Исследуем чувствительность следующего функционала:

$$J = \int_0^T \int_D \varphi(x, y, \sigma, t) \eta(x, y, \sigma, t) dD dt, \tag{20}$$

где  $\eta(x, y, \sigma, t)$  – заданная функция, характеризующая пространственно-временную подобласть, в которой мы исследуем изменения  $J$ .

Задачу оценки  $J$  удобно решать методом сопряжённых уравнений. В этом случае мы имеем:

$$J = \int_0^T \int_{D_0} \varphi^*(x, y, \sigma, t) Q(x, y, t) dD_0 dt + \int_D \varphi^0 \varphi^{*0} dD, \tag{21}$$

где  $D_0$  – проекция  $D$  на поверхность  $\sigma = 0$ , а  $\varphi^*$  – решение соответствующей сопряжённой задачи:

$$\begin{aligned}
 & -H \frac{\partial \varphi^*}{\partial t} - \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{r_x r_y} \frac{\partial}{\partial x} (H r_y u \varphi^*) + \frac{H u}{r_x} \frac{\partial \varphi^*}{\partial x} + \frac{1}{r_x r_y} \frac{\partial}{\partial y} (H r_x v \varphi^*) + \frac{H v}{r_y} \frac{\partial \varphi^*}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial \sigma} (\omega \varphi^*) + \omega \frac{\partial \varphi^*}{\partial \sigma} \right] - \\
 & - \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial \sigma} v \frac{\partial \varphi^*}{\partial \sigma} - \Lambda_{x,y} \varphi^* = \eta(x, y, \sigma, t), \\
 & v \frac{\partial \varphi^*}{\partial \sigma} = 0, \quad \sigma = 0, \\
 & v \frac{\partial \varphi^*}{\partial \sigma} = 0, \quad \sigma = 1,
 \end{aligned} \tag{22}$$

$$\frac{\partial \varphi^*}{\partial n} = 0, \partial D,$$

$$\varphi^* = 0, t = T.$$

Если положить, что в начальный момент загрязнение отсутствует, т.е.

$$\varphi^0 = 0,$$

то получим

$$\delta J = \int_0^T \int_{D_0} \varphi^*(x, y, \sigma, t) \delta Q(x, y, t) dD_0 dt. \quad (23)$$

Полагая

$$Q = Q_0(x, y) \text{ при } t \in (0, t_1),$$

$$Q = 0 \text{ при } t \in (t_1, T),$$

получим

$$\delta J = \int_{D_0} \delta Q_0(x, y) \left( \int_0^{t_1} \varphi^*(x, y, \sigma, t) dt \right) dD_0. \quad (24)$$

Таким образом, можно ввести функцию чувствительности:

$$\Phi(x, y, \sigma) = \int_0^{t_1} \varphi^*(x, y, \sigma, t) dt \quad (25)$$

которая определяет вклад каждой точки на поверхности в общее загрязнение рассматриваемой подобласти. Функция чувствительности зависит от формы «охраняемой области» (функции  $\eta$ ) и морской динамики, и не зависит от расположения источника загрязнения.

### 6.5 Модельная область и используемые данные

Для расчёта динамики и оценки загрязнения Чёрного моря модель циркуляции была реализована в сферической системе координат, в которой северный полюс был смещён на сушу в район Геленджика. Географические координаты нового северного полюса составляют  $38.35^\circ$  в.д. и  $44.75^\circ$  с.ш. Сеточное разрешение по новой долготе постоянно и равно  $0.3^\circ$ . Разрешение по новой широте является переменным и задаётся так, чтобы реальные шаги по широте в метрических единицах были равны реальным шагам по долготе на данной широте. Таким образом, получается, что разрешение сетки меняется от  $\sim 150$  м на геленджикском побережье в районе полигона ИОРАН до  $\sim 4.6$  км в северо-западной части Чёрного моря.

Данные по топографии Чёрного моря были взяты из атласа GEBCO (IOC et al., 2003), которые доступны на сайте [www.gebco.net](http://www.gebco.net). Данные были синтерполированы из географической системы в модельную, сглажены и ограничены снизу значением 1 м (рисунок 6.1). Данные для начальных условий по температуре и солёности были взяты из (Belokopytov, 2005). Для расчёта атмосферного воздействия подготовлены данные реанализа ERA-Interim, которые доступны на сайте <http://www.ecmwf.int/en/research/climate-reanalysis/era-interim>. Их разрешение составляет  $0.75^\circ$  по долготе и широте. Данные включают в себя следующие характеристики давление на уровне моря (шаг 6 ч), падающие длинно- и коротковолновую радиацию (12 ч), осадки (12 ч), влажность и температуру воздуха на высоте 2 м (6 ч) и скорость ветра на высоте 10 м (6 ч).

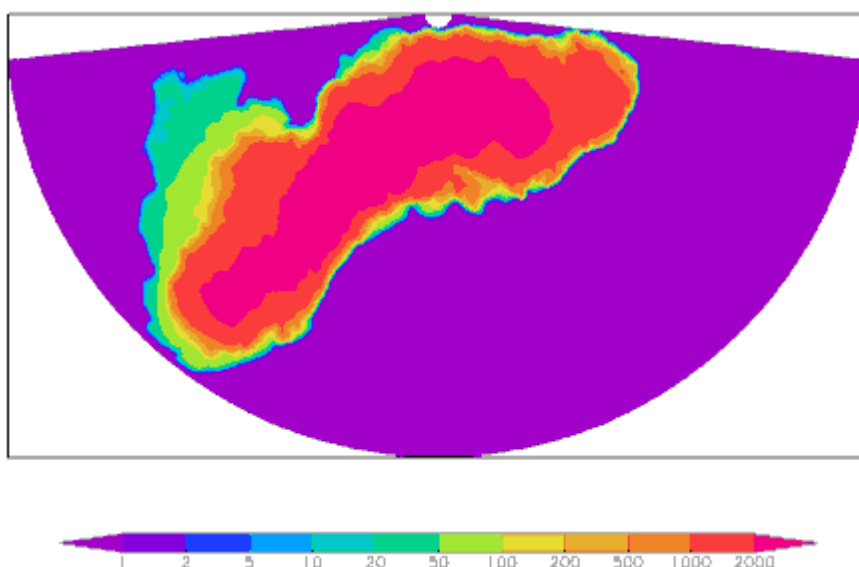


Рисунок 6.1 – Топография Чёрного моря, м.

## 7 РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ И МЕТОДИКИ НАТУРНЫХ КОМПЛЕКСНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ПОДСПУТНИКОВОМ ПОЛИГОНЕ В СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ

Разработка программ является самостоятельным видом исследований, предшествующий проведению эксперимента и направленный на поиск наиболее эффективных путей решения поставленных в работе задач, на успешное достижение цели настоящего ПНИ – создание научно-технического задела в области технологии мониторинга и краткосрочного прогнозирования экологического состояния акватории морского шельфа Черного моря на основе спутниковых и контактных измерений и высокоразрешающей численной модели циркуляции моря. В программе обозначены цели и задачи натуральных комплексных исследований экологических параметров на подспутниковом полигоне, теоретическое обоснование исследований. Дано описание технических средств, необходимых для выполнения работ, технологий и методов проведения исследований, определены направления их дальнейшего развития. Представлен план выполнения работ натуральных исследований.

При разработке программы учитывалось, что натурные исследования являются лишь составной частью ПНИ, но, с другой стороны, и наиболее ответственной ее частью. От качества контактных измерений зависит достоверность интерпретации спутниковых данных, точность расчетов верифицированных по результатам натурного эксперимента численных моделей. В программе определены пути совершенствования приборной базы подспутникового полигона, технологий контактных измерений, направленные на повышение точности и достоверности определения параметров морской среды.

### **7.1 Концептуальная основа Программы**

Натурные исследования экологических параметров на подспутниковом полигоне должны быть направлены на решение основной задачи – обеспечивать калибровку и верификацию спутниковых данных с целью дальнейшей разработки и усовершенствования методов дистанционного изучения и оценки состояния морской среды на больших акваториях в течение длительного времени.

Спутниковое наблюдение (мониторинг) за состоянием морских акваторий относится к числу наиболее сложных задач дистанционного зондирования – как в силу сложности, многофакторности и трехмерности происходящих в море процессов, так и из-за больших размеров акваторий, которые необходимо охватить регулярными наблюдениями. Процессы, происходящие в морской среде, высокодинамичны, а их изменчивость достаточно высока – как по диапазону значений, так и по скорости изменения параметров морской среды. В



результате этого повторяемость (стабильность) явлений, наблюдаемых на морских акваториях, оказывается недостаточной для интерпретации происходящих процессов только путем накопления ретроспективной информации в тех или иных базах данных и ее прямого использования в интересах анализа и прогноза. В силу этой специфики морские подспутниковые измерения и исследования должны опираться на комплексный мультидисциплинарный подход, включающий в себя проведение одновременных исследований объектов и процессов различной природы (физической, химической, биологической, географической), в том числе и антропогенные воздействия. Такой сложный комплексный подход требует тщательной проработки согласованности применяемых методов пробоотбора, получения, обработки и анализа первичных экспедиционных материалов.

## **7.2 Исходная информация для разработки Программы**

Проект направлен на решение одной из важнейших задач устойчивого развития современного общества – научно-технического обеспечения организации рационального природопользования, основанного на эффективном экологическом мониторинге состояния природной среды. Масштабные проекты нефтегазодобычи, имеющие общегосударственное значение, в XXI веке начали осуществляться на шельфе Каспийского и Охотского морей. Строятся и проектируются новые народнохозяйственные объекты в российской части Арктики. Компания «Роснефть» ведет изыскания и разработку технологий в целях глубоководного бурения в Черном море, в том числе на Туапсинском лицензионном участке. Ясно, что бесконтрольно, без оценки воздействий хозяйственной деятельности на природную среду бурение морского дна проводить нельзя. Слишком высока цена, которую придется заплатить за загрязнение акватории в случае техногенной аварии. Даже в условиях безаварийной работы хозяйственных объектов на морском шельфе нужно заранее просчитать и смоделировать процессы в акваториях, подверженных негативным воздействиям. А начинать надо с налаживания системы гидрометеорологических наблюдений и экологического контроля за зоной морского шельфа. Ввиду протяженности российского шельфа, приоритет должен быть отдан спутниковым средствам экологического мониторинга акваторий. Причем спутниковые дистанционные наблюдения из космоса должны опираться на несколько морских подспутниковых наблюдательных полигонов, на которых отрабатываются методы и калибруются данные спутниковых измерений с учетом региональных и климатических особенностей. Прежде всего, это относится к Азово-Черноморскому бассейну – по существу, единственной морской

рекреационной зоне России, огромные инвестиции в которую не должны быть перечеркнуты из-за многочисленных рисков загрязнений морского шельфа.

Активные исследования на Черном море ИО РАН проводит с момента создания в 1949 г. Черноморской научно-исследовательской станции (ЧЭНИС), преобразованной в 1967 г. в Южное отделение Института океанологии имени П.П. Ширшова РАН (ЮО ИО РАН). В начальный период основным направлением деятельности были отработка и усовершенствование экспериментально-методической базы проведения гидрофизических исследований. Основу исследований составляли судовые экспедиционные работы, в ходе проведения которых внимание уделялось усовершенствованию приборов, методик и технологий проведения эксперимента, определению погрешностей измерений.

Современный этап работ связан с развертыванием в 2011-2012 гг. экспериментального подспутникового полигона в шельфово-склоновой зоне г. Геленджика и обеспечением его непрерывного функционирования. Работы выполнялись в рамках гранта РФФИ 09-05-13527\_офи\_ц., а также Государственного контракта с Минобрнауки РФ № 11.519.11.5020 «Черноморский экспериментальный подспутниковый полигон в целях мониторинга состояния и исследования прибрежной экосистемы». На акватории полигона, на разном расстоянии от берега и различной глубине места (от 20 до 250 м) установлено 6 автономных станций, осуществляющих измерение гидрофизических параметров (температура, соленость, плотность воды, скорость течения, концентрация взвешенного вещества) практически во всей водной толще в месте постановки станции. Для обеспечения полигона регулярной метеорологической информацией налажено получение данных метеостанции г. Геленджика. На акватории полигона осуществляется проведение регулярных судовых исследований, включающих в себя комплекс гидрофизических, гидрохимических и биологических исследований. Эти исследования в значительной степени опираются на информацию об «абиотическом фоне», которую дают автономные станции, а также высококачественные спутниковые данные в ИК (температура поверхности моря) и видимом диапазоне (концентрация хлорофилла «а», яркость восходящего излучения) электромагнитного спектра.

Выбор направлений и методических подходов исследований по разрабатываемой Программе основывается на результатах предыдущих исследований на акватории подспутникового полигона ИО РАН за последние 12 лет. Эти исследования проводились по следующим тематикам:

- 1) развитие макро- и мезомасштабной динамики вод под влиянием изменчивости ветра (грант РФФИ 02-05-65154-а);

- 2) исследование процессов обмена в верхней части черноморского пикно-халоклина (грант РФФИ 05-05-64927-а);
- 3) исследование водообмена между шельфом и глубоководной частью моря как фактора обновления и самоочищения вод у побережья Краснодарского края (грант РФФИ 06-05-96672-р\_юг\_а);
- 4) взаимодействие разномасштабных гидрофизических процессов в шельфово-склоновой зоне моря (грант РФФИ 08-05-00183-а);
- 5) взаимодействие крупномасштабной циркуляции и мезомасштабной динамики моря в связи с климатом (грант РФФИ 09-05-92501-ИК\_а);
- 6) изучение гидрофизических процессов, определяющих тонкую структуру вертикального распределения кислорода в море (грант РФФИ 10-05-01091-а);
- 7) процессы формирования гидрологического климата шельфовой зоны Черного моря (грант РФФИ 10-05-00689-а).
- 8) технологии многоуровневого регионально-адаптированного экологического и геодинамического мониторинга морей Российской Федерации в первую очередь районов шельфа и континентального склона (ФЦНТП № РП–22.1/001);
- 9) технологии защиты портов и морских каналов от заносимости, оценки влияния портового строительства на окружающую среду (ФЦП «Модернизация транспортной системы России», подпрограмма «Морской транспорт»);
- 10) технологии автономного профилирования водной толщи на заякоренной буйковой станции в целях изучения изменчивости морской среды и биоты (грант РФФИ 06-05-08092-офи);
- 11) система геодинамического и экологического мониторинга (договор ИО РАН с «ЛУКОЙЛ-ВолгоградНИПИморнефть», №4350 РД с/п, 2007 г.),
- 12) макет измерительного комплекса для оперативного мониторинга морской среды в водах шельфово-склоновой зоны (грант РФФИ 08-05-12046-офи\_ц);
- 13) макет гидрометеорологического полигона на шельфе Черного моря для изучения реакции морской среды на атмосферные воздействия и климатические изменения с помощью комплекса автоматизированных измерительных средств (грант РФФИ 09-05-13527-офи\_ц).

По результатам исследований проанализирована пространственно-временная изменчивость гидротермодинамических процессов в Чёрном море. Проведена оценка содержания минеральных и органических форм биогенных элементов в прибрежной зоне моря в 2003-2013 гг. Рассмотрена межгодовая изменчивость в течение этого периода, выполнено сравнение биогенного режима между различными акваториями. Установлено,

что для открытых районов шельфа долговременные тренды являются незначительными, а для акваторий с затрудненным водообменом наблюдается устойчивый рост концентраций химических веществ. На примере Геленджикской бухты получены количественные оценки уровня антропогенной нагрузки на её акваторию.

На основе анализа данных многолетних физических и биологических наблюдений было проанализировано влияния режима циркуляции вод в прибрежном районе Черного моря на характер кросс- и вдоль- шельфового переноса. Было показано, что режим с доминированием быстрой, прижатой к склону, струи Основного Черноморского течения (ОЧТ) характеризуется затрудненным кросшельфовым водообменом, в то время как "волно-вихревой" режим с угасающим и распадающимся ОЧТ способствует переносу взвешенного материала от берега в открытое море и увеличивает вентиляцию прибрежных районов. Показано, что мезозoopланктонные сообщества являются хорошим индикатором водообменных процессов в системе «шельф – глубокое море».

Принципиальным результатом исследований Черноморского региона последних лет стало понимание того факта, что адекватное представление о его экосистеме, прогноз ее состояния невозможны без постоянного комплексного изучения бассейна. На современной основе такие работы были начаты ИО РАН в 1999 году и продолжаются вплоть до настоящего времени. Они позволили выявить исключительно тесную связь климатических изменений с факторами, определяющими экологическое состояние бассейна: режимом общей и мезомасштабной циркуляции вод, прежде всего обменом на границе шельф – глубокий бассейн; переносом загрязнений с процессами внутрибассейнового водообмена; взаимодействием кислородных и сероводородных вод и их влиянием на биогенные циклы; биологической продуктивностью; появлением и развитием видов-вселенцев и т.п.

Установлено, что в настоящее время из-за антропогенного стресса значительная часть акватории шельфа Черного моря находится в состоянии экологического неблагополучия. Наиболее интенсивное антропогенное влияние испытывают прибрежные зоны: неочищенные ливневые стоки городов и предприятий; смыв удобрений и пестицидов с полей и виноградников; интенсивное судоходство; береговое и морское строительство, рекреационное воздействие. Ухудшение экологической обстановки привело к падению привлекательности традиционных мест отдыха. Оценки георисков, сейсмичности дна Черного моря и оползневой опасности проведены только для некоторых локальных участков акватории. Поступление в Черное море с поверхностным стоком биогенных элементов до сих пор не имеет четкой количественной оценки. В настоящее время требуется также провести переоценку балансовых моделей потоков вещества в Черном море.

Очевидно, что дальнейший прогресс в понимании закономерностей развития экосистемы Черного моря в значительной степени зависит от активности в проведении фундаментальных и прикладных исследований, от развития новых подходов, привлечения современных методов и расширения арсенала средств исследований, выполняемых в рамках общей долговременной стратегии. Это необходимо не только для получения принципиально новых результатов в комплексных черноморских исследованиях, но и для эффективного развития того задела, который был создан в исследовании Черного моря как единой природной системы.

Фундаментальный подход к комплексному исследованию экосистемы Черного моря должен основываться на двух основных принципах:

а) перманентного контроля ключевых параметров состояния морской среды и биоты, а также факторов внешнего воздействия (естественного и антропогенного) на экосистему;

б) мультидисциплинарного изучения закономерностей функционирования и современной динамики различных (биотических и абиотических) составляющих морской экосистемы и функциональных взаимосвязей между ними в условиях изменяющегося внешнего воздействия климатических и антропогенных факторов.

Указанные принципы заложены в основу программы натуральных комплексных исследований экологических параметров Черноморского на подспутниковом полигоне.

### **7.3 Цель и основные задачи Программы**

Выделив особенность спутниковых наблюдений и подспутниковых исследований на морских акваториях, в первую очередь в прибрежных (шельфово-склоновых) зонах морей России, мы сформулировали основную цель Программы – провести исследования ведущих параметров морской среды в шельфово-склоновой зоне Черного моря в районе существующего подспутникового полигона ИО РАН в районе г. Геленджик с целью получения необходимых данных для разработки и верификации регионально адаптированных алгоритмов и методик использования результатов спутниковых наблюдений.

Достижение поставленной цели обусловлено решением следующих задач:

- проведение комплексных судовых натуральных экологических исследований на стандартных разрезах в шельфово-склоновой зоне Черного моря в районе г. Геленджик;
- исследование гидрохимической структуры прибрежных вод;
- исследование гидрофизических параметров морской среды прибрежных районов;
- исследование гидробиологических характеристик прибрежных вод;
- сбор и анализ метеорологической информации в районе исследований.

## 7.4 Характеристика района исследований

### 7.4.1 Географическое положение подспутникового полигона

Натурные исследования будут проводиться в зоне морского шельфа российского сектора Черного моря на базе Южного отделения Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (ЮО ИОРАН, г. Геленджик) на гидрофизическом полигоне, развернутом в 2011-2012 гг. Гидрофизический полигон представляет собой многопрофильный комплекс, объединяющий в себе набор средств измерений, обработки, накопления и передачи данных, соответствующую им информационную инфраструктуру, комплекс технических средств обеспечения, включая судовые и стационарные средства, определенную производственную и бытовую инфраструктуру, здания и сооружения, финансовое обеспечение и т.д., а также людские и интеллектуальные ресурсы, архивы и банки данных, методики организации научно-экспериментальных работ и т.п.

Полигон размерами ~10x10 км развернут в зоне морского шельфа северо-восточной части Черного моря в районе г. Геленджика. С северо-западной части он ограничен створом Голубой (Рыбацкой) бухты, с юго-восточной – створом Толстого мыса Геленджикской бухты (рисунок 7.1).

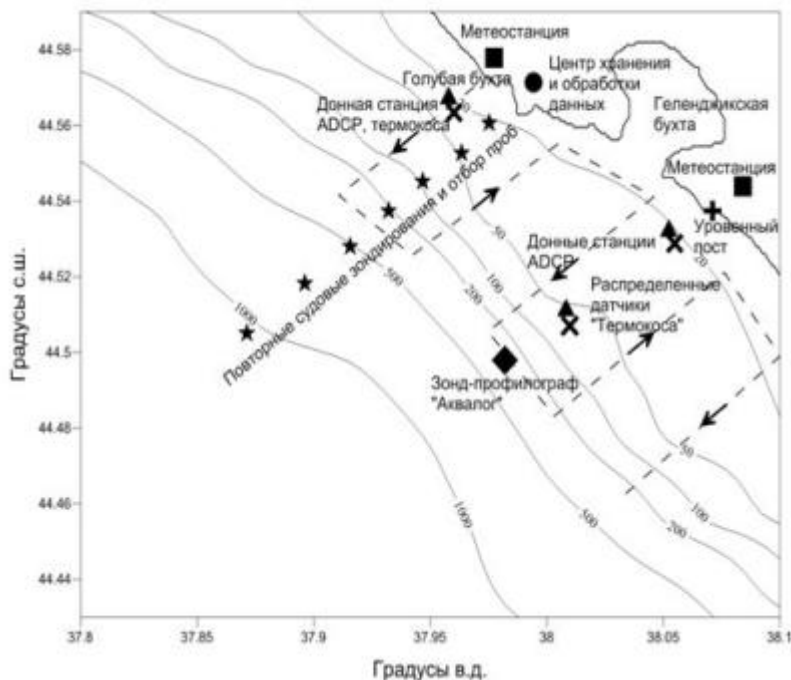


Рисунок 7.1 – Схема постоянно действующего гидрофизического полигона: квадрат – метеостанции; треугольник – донные станции ADCP; крест – термокосы; ромб – зонд-профилограф «Аквалог». Звездочками обозначены станции судовых мониторинговых наблюдений, включающих CTD – зондирования. Пунктирной линией со стрелками обозначены галсы судна при проведении измерений поля скорости течения с помощью буксируемого за судном ADCP

Комплексные исследования экологических параметров морской среды выполняются на стандартном разрезе, расположенного в траверзе Голубой бухты (рисунок 7.2).

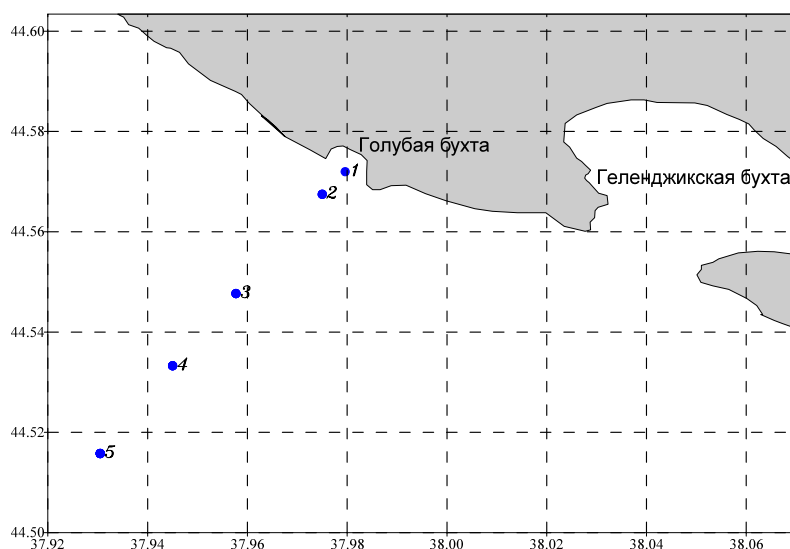


Рисунок 7.2 – Расположение станций судовых экологических исследований стандартного 5-ти мильного разреза в створе Голубой бухты

Координаты станций судовых экологических исследований стандартного 5-ти мильного разреза в створе Голубой бухты приведены в таблице 7.1.

Таблица 7.1 – Координаты станций стандартного 5-ти мильного разреза.

№ точки	Широта	Долгота	Глубина, м
1	44° 34,32	37° 58,776	10
2	44° 34,5	37° 58,5	25
3	44° 32,86	37° 57,46	50
4	44° 32,0	37° 56,70	100
5	44° 30,95	37° 55,83	500

#### 7.4.2 Гидродинамические условия района исследований

Гидрологический режим и экологическое состояние прибрежной шельфовой зоны Черного моря определяется многими внешними факторами и, прежде всего, динамикой вод, главным элементом которой является Основное Черноморское течение (ОЧТ). В свою очередь интенсивность ОЧТ зависит от крупномасштабного ветрового форсинга, которое в литературе получило название экмановской накачки. В период его ослабления течение замедляется и начинает меандрировать, формируя мезомасштабные вихревые структуры, играющие важную роль в процессах «самоочистки» прибрежной зоны от поступающих с берега загрязнений. Вдольбереговое перемещение мезомасштабных вихрей являются

наиболее вероятной причиной выявленных с помощью зонда-профилографа «Аквалог» интенсивных колебаний положения перманентного пикно-халоклина (14.4 -16.2 усл. ед.), с характерным периодом 5-10 суток [25]. Такая короткопериодная перестройка гидрологической структуры сопровождается интенсивной адвекцией вод, их вертикальным и горизонтальным перемешиванием и оказывает значительное влияние на гидрохимическую структуру, потоки биогенных и загрязняющих веществ.

Определяющее влияние ОЧТ и мезомасштабных структур на динамику прибрежных вод относится к традиционным представлениям. Исследования последних лет дали основание полагать, что механизмы формирования течений, вихрей в прибрежной шельфовой зоне значительно сложнее, чем это следует из “традиционных” схем циркуляции моря. Шельфовая зона характеризуется собственными короткопериодными модами пространственно-временной изменчивости. Вблизи берега на шельфе значительную часть времени присутствуют субмезомасштабные вихри – как циклонические, так и антициклонические, диаметр которых изменяется в пределах первого десятка километров, а время их жизни – от нескольких часов до нескольких суток. Вопросы их влияния на формирование гидрологической структуры, на динамику и перенос антропогенных загрязнений остаются малоизученными и требуют дальнейших исследований.

Короткопериодная перестройка гидрологической структуры также связана с локальной неоднородностью действия ветра, ветро-волновым перемешиванием, процессами апвеллинга-даупвеллинга. В настоящее время неизвестно, какую относительную роль в этой перестройке играют определяющие факторы, как они соотносятся и взаимодействуют друг с другом, неизвестны временные масштабы реакции шельфовой зоны на внешнее воздействие, закономерности трансформации структуры вод на разном расстоянии от берега.

### **7.4.3 Гидрохимическая характеристика района исследований**

Черное море представляет собой уникальный водоем, как с точки зрения гидрофизической структуры, связанной с наличием в нем двух слоев воды, образуемых из вод речного стока и вод нижнего Босфорского течения, так и гидрохимической структуры, характерная черта которой – сероводородное заражение нижнего слоя воды. Гидродинамические характеристики и структура водной толщи Черного моря являются основой, определяющей распределение всех гидрохимических параметров. Плотностная стратификация затрудняет перемешивание и обуславливает появление сероводорода, аммиака и других восстановленных форм в глубинной воде. Исследованиями показано, что



в зоне контакта кислородных и сероводородных вод экстремумы вертикального распределения всех гидрохимических характеристик связаны с плотностной структурой. Ярко выраженные градиенты и экстремумы? их четкая приуроченность к определенным изопикническим поверхностям свидетельствуют о доминировании геохимических процессов в формировании вертикальной гидрохимической структуры.

Основные факторы, определяющие изменчивость гидрохимических параметров в водной среде района исследований следующие:

1) Сезонные изменения температуры и солености вод. Влияние этих факторов в основном обусловлено изменением плотности воды и соответствующим постоянством или изменчивостью верхнего однородного слоя и связанных с ним гидрохимических характеристик.

2) Сезонные изменения активности водной биоты. Отражаются на соотношении биохимических процессов синтеза и окисления органического вещества и соответствующих изменений гидрохимических параметров.

3) Влияние струи Основного Черноморского Течения и генерируемых им циклонических и антициклонических вихрей. Определяет основное направление переноса вод и, соответственно, гидрохимических параметров в северо-западном и юго-западном направлениях и усиливает степень перемешивания вод.

4) Топографический и ветровой апвеллинг. Поднятие вод сопровождается увеличением содержания биогенных элементов, величин общей щелочности, содержания всех форм растворенного неорганического углерода.

5) Воздействие стока малых и средних рек. Речной сток является источником биогенных веществ, а также антропогенных загрязнений продуктами промышленного и сельскохозяйственного производства. Этими факторами определяется его влияние на функционирование биологических сообществ и изменчивость гидрохимического режима.

Все характерные особенности (горизонты выклинивания кислорода, сероводорода, экстремумы биогенных элементов) распределения по глубине гидрохимических параметров обычно находятся ниже в прибрежной зоне Черного моря и выше в центральных областях, но почти всегда попадают на одни плотностные уровни. По этой причине построение графиков с использованием глубины в качестве вертикальной шкалы обычно дает разброс данных. Однако при отображении в поле плотности те же данные демонстрируют гораздо меньшую изменчивость, поэтому в качестве глубинной координаты в Черном море обычно используется плотность.

В целом все величины гидрохимических параметров исследуемого района находятся в пределах средних климатических значений данных характеристик для прибрежной зоны

северо-восточной части Черного моря. На сегодняшний день, газовый и биогенный режим акватории соответствует установленным нормам по [89].

#### 7.4.4 Экологические условия района исследований

Черноморская экосистема развивается под воздействием различных естественных, климатических и антропогенных факторов. Она продолжает быстро и, чаще всего, непредсказуемо изменяться и в настоящее время. Исследования последних двух десятилетий показали, что в развитии абиотических и биотических компонентов Черного моря существуют направленные высокоскоростные изменения, которые позволили выявить современный этап эволюции экосистемы.

Наиболее существенным фактором, определяющим современное развитие экосистемы Черного моря, является климатический тренд, влияние которого выражается в быстром потеплении регионального климата. За два последних десятилетия увеличились средне-зимние значения температуры воздуха над Черноморским регионом. Соответственно выросла (почти на 2° С) средняя температура поверхности моря. Это привело к ослаблению зимней конвекции, являющейся основным механизмом поступления кислорода в холодный промежуточный слой (ХПС) и верхнюю часть черноморского пикнохалоклина. ХПС стал менее выраженным. Процессы окисления сероводорода на верхней границе сероводородной зоны замедлились. Уменьшился осуществляемый конвекцией приток биогенных элементов в верхний эвфотический слой моря и практически пропал зимне-весенний пик цветения фитопланктона.

Уменьшилось ветровое воздействие. В связи с уменьшением ветрового форсинга, являющегося основным фактором поддержания общей циркуляции вод Черного моря, изменился режим Основного черноморского течения (ОЧТ). Во многих случаях, в особенности в летнее время, вместо ОЧТ наблюдается система вихревых структур, осуществляющих перенос вод как вдоль, так и поперек континентального склона. Изменение термического и динамического режимов моря сказывается на положении верхней границы сероводородной зоны, на структуре и функционировании планктонных сообществ, на взаимодействии экосистем шельфа и глубокого моря, и на многих других процессах и параметрах морской среды и биоты.

Не менее сильное воздействие на черноморскую экосистему оказывают антропогенные факторы. Это воздействие в последние два десятилетия было связано не только с процессами эвтрофикации и поступления в прибрежные воды различных загрязняющих веществ (тяжелых металлов, нефтеуглеводородов и др.), но и со вселением в Черное море чужеродных видов, прежде всего, гребневиков *Mnemiopsis leidyi* и *Beroe ovata*.

## **7.5 Разработка методики натуральных комплексных исследований экологических параметров на подспутниковом полигоне**

### **7.5.1 Определение принципиальной схемы методики**

При разработке методики проведения натуральных комплексных исследований экологических параметров на подспутниковом полигоне учитывалась сложность морских природных комплексов и процессов, в них происходящих. Пространственно-временные параметры состояния и изменчивости морской среды и морских сообществ живых организмов можно достоверно исследовать и осуществлять мониторинг только при использовании современных методов океанологических исследований по физическому, химическому и биологическому направлениям.

Была определена принципиальная схема методики экспериментальных исследований важнейших компонентов морской среды и биоты в шельфово-склоновых районах. Эта схема включает в себя три основных направления, по которым должны проводиться комплексные исследования: гидрофизические, гидрохимические и гидробиологические работы. В связи с высокой подвижностью морской среды, что обусловлено как перемешиванием речных (пресных) и морских (соленых) вод, так и температурными эффектами, основным методическим принципом должен быть широкомасштабный охват исследуемых морских акваторий за достаточно короткий период времени.

Анализ информации о результатах предыдущих исследований морской биоты в условиях воздействия различных факторов среды, как выполненных собственными силами, так и полученных из литературных источников, позволил разработать требования к проведению исследований.

### **7.5.2 Методы гидрофизических полевых исследований в рамках Программы**

Исследования гидрологических параметров зондом производятся SBE 19plus на станциях с борта судна с помощью тросовой лебедки. Зонд, закрепленный на тросе, выводится за борт судна и для выравнивания температуры датчиков прибора с температурой воды выдерживается в поверхностном слое порядка 1 мин. Далее опускается на заданную глубину: на шельфе – до дна; на шельфовом склоне и глубоководной части моря – до глубины 300 м. Скорость опускания зонда составляет от 0.3 до 1 м/с.

Регистрация данных измерений осуществляется автономной памятью зонда, после завершения зондирования данные переписываются на персональный компьютер.

Все полученные данные измерений гидрологической структуры вод проходят контроль качества с отфильтровыванием сбойных значений, сглаживаются по вертикали

"скользящим средним" с окном 2 метра, интерполируются на стандартные горизонты с разрешением 1 м по вертикали.

Предварительно данные зондирования проходят стандартную корректировку, компенсирующую разное время отклика датчиков температуры и электропроводности, а также вертикальные колебания зонда при движении зонда из-за волнения морской поверхности. После этого строятся вертикальные профили, пространственные разрезы и временной ход (с учетом ранее выполненных работ) изменчивости гидрологических параметров.

Технические средства для проведения гидрофизических измерений:

- гидрофизический зонд «Sea Bird» фирмы Sea-Bird Electronics, Inc., США с розеткой SeaBird SBE 55 на 6 батометров;
- бортовой блок SeaBird SBE 33 для коммутации с зондом;
- полевой ноутбук Panasonic CF-29 МК4.

### **7.5.3 Методы гидрохимических полевых исследований в рамках Программы**

Основу методики проведения экспериментальных исследований в морских экосистемах в шельфово-склоновых районах по гидрохимическому направлению составляют стандартные методы проведения гидрохимических анализов в соответствии с действующими нормативными документами [90, 91].

Отбор проб в море проводится пластиковыми батометрами Нискина в соответствии с ГОСТ 17.1.5.05-85 "Общие требования к отбору проб поверхностных и морских вод". Сразу после отбора пробу переливали в посуду для хранения проб по ГОСТ 17.1.5.04-81 «Охрана природы. Гидросфера. Приборы и устройства для отбора, первичной обработки и хранения проб природных вод. Общие технические условия», в зависимости от определяемого компонента.

Отбор проб из батометров, осуществлялся непосредственно после их подъема на борт судна. Пробы отбираются через тайгоновые прозрачные шланги, позволяющие контролировать отсутствие пузырька воздуха при заполнении склянок. Сразу после отбора выполняется фиксация проб на растворенный кислород, сероводород и аммонийный азот. На определение биогенных элементов (силикаты, фосфаты, формы азота, валовый азот и фосфор и др.) пробы отбираются в пластиковую посуду на 0.5 л без консервации.

Лабораторный химический анализ проб воды выполняется по следующим методикам.

Растворенный кислород определяется по модифицированному методу Винклера, с использованием полуавтоматической титровальной установки "Digitrate".

Величина рН определяется потенциометрическим методом по РД 52.10.243-92 с помощью иономера И-500.

Щелочность определяется методом прямого титрования в береговой лаборатории.

Фосфаты определяются фотометрически по методу Морфи-Райли.

Силикаты определяются фотометрически при концентрациях ниже 60 мкМ в пробе по методу Королева с образованием голубого молибденового комплекса, при более высоких концентрациях – по желтому.

Валовый/органический фосфор определяется сожжением до фосфатов на водяной бане с персульфатом калия.

Аммонийный азот определяется по методу Сэджи-Солорзано с образованием фенол-гипохлоритного комплекса.

Нитритный азот (нитриты) определяется колориметрически по (РД 52.10.243-92). Для калибровки метода применялись СО массовой концентрации нитрит ионов ГСО 7862-2000. Предел чувствительности определения элемента составлял 0.0005 мг/л.

Нитратный азот (нитраты) определяется колориметрически после его восстановления на кадмиевых колонках до нитритного азота по (РД 52.10.243-92). Предел чувствительности определения элемента составлял 0.005 мг/л.

Валовый/органический азот определяется по методу Вальдеррама сжиганием в автоклаве при температуре 105 °С в течение 40 минут с разложением до нитратов.

Сероводород определяется фотометрически при небольших концентрациях с диметил-пара-финелендиамином, а при больших концентрациях – иодометрическим титрованием.

Для аналитических определений используется оборудование Лаборатории химии ЮО ИОРАН, аккредитованной в Системе аккредитации аналитических лабораторий (СААЛ) Госстандарта России (Аттестат №РОСС RU.0001.512500).

Технические средства для проведения гидрохимических измерений:

- пластиковые 4-литровые батометры Нискина;
- автоматические шприц-пипетки, дозаторы, диспенсеры и т.п.;
- посуда для отбора и реактивы для фиксации проб;
- переносные пластиковые бокс-холодильники;
- диск Секки;
- дночерпатель Петерсена.

#### **7.5.4 Методы гидробиологических полевых исследований в рамках Программы**

На станциях пробы фитопланктона отбираются из батометров Нискина. Объем пробы составляет 1,3-1,5 литра. Выбор горизонтов для отбора проб производится по результатам

CTD-зондирования по следующей схеме: поверхность - верхняя граница термоклина - максимум флюоресценции - нижняя граница термоклина - ядро ХПС - 1% уровень освещенности.

После отбора, пробы немедленно фиксируются формалином, нейтрализованным бораксом; конечная концентрация формалина в пробе должна составлять 1.5-2%. В лабораторных условиях пробу необходимо концентрировать до объёма 100мл по общепринятой методике осаждения. Определение видов и подсчет организмов производится под микроскопом в камере Ножотта.

Определение концентрации хлорофилла «а» воде выполняется флуорометрическим или спектрофотометрическим методом. Пробу воды (0,5-1,0 л) фильтруют через мембранный фильтр типа GF/F при разрежении не более 0,3 атм. Фильтр с осадком выдерживают в 90%-м ацетоне при температуре 4°C течение 24 ч. Содержание хлорофилла «а» в экстракте измеряют с помощью флуориметра или спектрофотометра.

Методики судовых натурных измерений зоопланктона разработаны на основе регулярных наблюдения, проводившихся в период с конца июня 2005 года по январь 2008 на 10-мильном кросшельфовом разрезе у северо-восточного побережья Черного моря.

На разрезе выбираются три станции: на внутреннем шельфе (над глубиной 25-30 м), на срединном шельфе (55-60 м) и в области континентального склона (500-1000 м). Для исследования вертикального распределения планктона на разрезе проводится послойные ловы. Кроме того, для анализа вертикальных миграций планктона выполняется суточная станция, когда судно в течение суток позиционируется в одной точке. Параллельно с послойными ловами отбираются пробы воды на содержание хлорофилла «а».

Для анализа влияния гидрофизических и гидродинамических условий на пространственное распределение и функционирование зоопланктонного сообщества, перед сбором планктона с борта судна проводится исследования гидрологической структуры толщи воды.

Для сбора мезозоопланктона используется стандартная сеть Джели (площадь входного отверстия – 0.1 м<sup>2</sup>, ячейя фильтрующего конуса - 180 μм). Желетелый зоопланктон собирается при помощи конической сети с площадью входного отверстия 0.5 м<sup>2</sup> и ячейей 500 μм. Ловы выполняются со скоростью 0.8-0.9 м/с. Объем профильтрованной воды определяется по длине троса и площади входного отверстия, принимая коэффициент фильтрации равным 100%. Глубина опускания сетей рассчитывается по длине и углу наклона троса.

На шельфе тотальные ловы нежелетелого зоопланктона проводятся от дна до поверхности, а в зоне континентального склона – от границы сероводородной зоны

(условная плотность  $\sigma_\theta = 16.2$ ) до поверхности. Желетельный планктон собирается тотальными ловами от дна до поверхности на шельфе и с глубины 80 метров до поверхности в зоне континентального склона. Количественную и качественную обработку проб желетелого зоопланктона следует осуществлять без фиксации на борту корабля. Нежелетельный зоопланктон фиксируется 4% формалином, нейтрализованным бораксом.

Определение и количественный учёт животных проводятся под биноклем при увеличении  $\times 40$ . Представителей меропланктона следует определять до отряда, остальных животных определять до вида. При определении копепод также учитываются копеподитные стадии.

Технические средства для проведения гидробиологических исследований:

- сеть Джели (площадь входного отверстия –  $0.1 \text{ м}^2$ , ячея фильтрующего конуса -  $180 \text{ мкм}$ );
- коническая сеть (площадь входного отверстия  $0.5 \text{ м}^2$ , и ячея –  $500 \text{ мкм}$ );
- пластиковые 4-литровые батометры Нискина;
- посуда для отбора и реактивы для фиксации проб.

#### **7.6 Формирование состава, видов и объемов работ на подспутниковом полигоне в ходе натурных комплексных экологических исследований**

Натурные исследования по проекту выполняются в два этапа: июль-декабрь 2014 г и январь-декабрь 2015 г. Общий объем работ составит: в 2014 году – не менее 6 комплексных натурных исследований экологических параметров на стандартном разрезе, в 2015 – не менее 12.

Комплексные натурные исследования экологических параметров на стандартном разрезе должны включать следующие объемы и виды работ:

1) Количество станций на разрезе – не менее 5 с глубинами места отбора проб ориентировочно 10, 25, 50, 100 и 500 м.

2) На каждой станции отбору химических и гидробиологических проб должны предшествовать исследования гидрологической структуры. Определяемые параметры по результатам гидрологических исследований:

- вертикальное распределение температуры, солености, плотности;
- нижняя граница верхнего квазиоднородного слоя (ВКС);
- положение слоя температурного скачка;
- положение ядра ХПС;
- нижняя граница кислородосодержащего слоя (условная плотность  $\sigma_\theta = 15.8$ );

- граница сероводородного слоя (условная плотность  $\sigma_{\theta}= 16.2$ ).

3) На каждой станции проводят отбор проб воды на химический анализ. Горизонты отбора проб определяют по результатам гидрологических исследований. Отбор проб проводят для лабораторного определения следующих химических параметров: растворенный кислород, рН, общая щелочность, фосфаты, валовый фосфор, силикаты, нитриты, нитраты, аммоний, валовый азот, сероводород.

4) На каждой станции производят отбор гидробиологических проб. Горизонты отбора проб фитопланктона и хлорофилла «а» определяют по результатам гидрологических исследований. Пробы фитопланктона отбирают из батометров Нискина.

Для сбора мезозoopланктона используют стандартную сеть Джеди, для сбора желетелого зоопланктона – конусную сеть. На шельфе тотальные ловы зоопланктона проводят от дна до поверхности, а в зоне континентального склона – от границы сероводородной зоны (условная плотность  $\sigma_{\theta}= 16.2$ ) до поверхности.

Послойные ловы необходимо проводить по следующей схеме слоев:

1 слой – от поверхности до нижней границы ВКС;

2 слой – слой температурного скачка до верхней границы ХПС;

3 слой – ХПС;

4 слой – от нижней границы ХПС до границы кислородосодержащего слоя (условная плотность  $\sigma_{\theta}= 15.8$ );

5 слой – от границы кислородосодержащего слоя до граница сероводородного слоя (условная плотность  $\sigma_{\theta}= 16.2$ ).

### **7.7 Особенности проведения натуральных экологических исследований в шельфово-склоновой зоне Черного моря**

Ярко выраженные градиенты и экстремумы, их четкая приуроченность к определенным изопикническим поверхностям свидетельствуют о тесной связи гидрофизических процессов в формировании вертикальной гидрохимической, гидробиологических структур морской воды. В гидрохимии Черного моря большое распространение получил подход, при котором распределение химических элементов рассматривается в поле плотности, что стало определенным стандартом. Этот подход базируется на факте безусловного доминирования обменных процессов вдоль изопикнических поверхностей, по сравнению с обменом через изопикны.

Как отмечалось выше, распределение биогенных элементов тесно связано с плотностной стратификацией морских вод, поэтому горизонты отбора проб воды для



каждой станции необходимо выбирать по значению условной плотности. Ориентиром должно служить вертикальное распределение плотности воды, получаемое в режиме реального времени при зондировании STD-зондом. Именно только таким образом, необходимо осуществлять прицельный отбор проб с необходимой дискретностью, особенно в редокс зоне Черного моря.

В случае, когда горизонты отбора проб при полевых исследованиях не попадают в эти узкие слои экстремумов гидрохимических параметров, картина их распределения будет существенно искажаться. Информация о положении в поле плотности глубин выклинивания и экстремумов химических характеристик Черного моря приобретает ключевое значение для получения репрезентативных, качественных гидрохимических данных. Даже на сегодняшний день приходится сталкиваться с ситуацией, когда при планировании экспедиционных работ в море исследователи опираются для выбора горизонтов отбора проб на определенные глубины, а не на вертикальное распределение плотности воды.

При проведении натурных исследований по проекту необходимо отработать методику определения характерных горизонтов отбора химических и гидробиологических проб по результатам STD-зондирования в режиме реального времени. При этом определяющим параметром должна быть условная плотность морской воды.

В случае использования STD-зонда с розеткой должна быть отработана следующая схема отбора проб:

1) при движении зонда с розеткой вниз – в режиме реального времени с помощью информации, передаваемой на бортовой компьютер, по условной плотности определяются характерные горизонты отбора проб;

2) при движении зонда с розеткой вверх – производить отбор проб воды на выделенных горизонтах. Срабатывание батометров на заданных горизонтах контролировать в режиме реального времени с помощью бортового компьютера.

## **7.8 Требования по технике безопасности при выполнении натурных исследований**

При выполнении натурных измерений должны выполняться следующие требования по обеспечению безопасности для жизни и здоровья людей и охраны окружающей среды

- технические средства системы мониторинга должны соответствовать общим требованиям безопасности и обеспечивать безопасные условия труда обслуживающего персонала;

- электробезопасность приборных комплексов должна обеспечиваться в соответствии с требованиями "Правил устройства электроустановок" (ПУЭ) и ГОСТ 12.1.038-82;
- защита от статического электричества должна обеспечиваться в соответствии с требованиями ГОСТ 12.1.019-2009;
- работа с аппаратурой не должна требовать применения специальных мер защиты обслуживающего персонала;
- работы с аппаратурой на всех этапах эксплуатации должны проводиться с соблюдением требований ГОСТ 12.0.002-80;
- отказ в работе аппаратуры не должен приводить к возникновению пожара или повреждению других систем, а также короткому замыканию цепей электроснабжения;
- конкретные требования по технике безопасности определяются инструкцией по эксплуатации.

## 8 ПРОВЕДЕНИЕ НАТУРНЫХ КОМПЛЕКСНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ПОДСПУТНИКОВОМ ПОЛИГОНЕ В СЕВЕРОВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ В СООТВЕТСТВИИ С ПРОГРАММОЙ И МЕТОДИКОЙ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 8.1 Общие сведения о выполненных исследованиях

По программе комплексных исследований экологических параметров на подспутниковом полигоне в северо-восточной части Черного моря в соответствии с программой и методикой исследований за отчетный в общей сложности было выполнено 17 экспедиционных выходов на БМП-74 «Ашамба», оборудованном всеми техническими средствами, необходимыми для решения задач натурных исследований.

Научно-исследовательское судно БМП-74 «Ашамба» характеризуется следующими техническими параметрами:

- бортовое электропитание 220В, 380В, 12 В;
- бензиновый генератор – 1 Квт, 220 В;
- двух-барабанная лебедка с турачкой грузоподъемностью до 250 кг;
- кормовая П-рама для работы с STD-зондами, а также используемая для постановки и снятия донных и заякоренных станций,
- отводная стрела 5 м по левому борту для работы с планктонными сетями;
- эхолот;
- GPS-навигатор.

В ходе экспедиционных работ на БМП-74 «Ашамба» решались следующие основные задачи:

1) выполнение комплексных экологических исследований на судовых разрезах с определением гидрологических, химических, биологических параметров морской среды в области шельфа - континентального склона с регулярностью 2-3 раза в месяц (с июня по декабрь);

2) исследования гидродинамической структуры шельфа - континентального склона с помощью буксируемого акустического доплеровского профилографа RDI WH 300 кГц;

3) обеспечение подъема и постановки автономных станций на подспутниковом полигоне.

Описание задач каждого экспедиционного выхода представлено в таблице 8.1.

Таблица 8.1 – Состав и сроки проведения экспедиционных работ на БМП-75 «Ашамба»

№	Направление исследований	Даты проведения	Краткое описание задач
1	Гидродинамические исследования	24.06 – 1 выход.	Исследования течений буксируемым ADCP
2	Мониторинговые экологические исследования (суточная станция)	01.07.-02.07 – 1 выход	Исследования гидрофизических, гидробиологических и гидрохимических параметров
3	Мониторинговые экологические исследования	15.07., 31.07 – 2 выхода	Исследования гидрофизических, гидробиологических и гидрохимических параметров
4	Мониторинговые экологические исследования	11.08, 14.08 – 2 выхода	Исследования распределения метана в шельфовой зоне
5	Мониторинговые экологические исследования	12.08, 26.08 – 2 выхода	Исследования гидрофизических, гидробиологических и гидрохимических параметров
6	Мониторинговые экологические исследования	12.09. – 1 выход	Измерения концентраций взвеси и хлорофилла «а» на подспутниковом полигоне
7	Гидродинамические исследования	27.09 – 1 выход.	Исследования течений буксируемым ADCP
8	Гидродинамические исследования	29.09 – 1 выход.	Исследования течений буксируемым ADCP, запуск дрейфтеров
9	Мониторинговые экологические исследования	30.09. – 1 выход	Исследования гидрофизических, гидробиологических и гидрохимических параметров
10	Мониторинговые экологические исследования	30.10. – 1 выход	Мониторинговые экологические исследования
	Всего	с 24.06 по 30.10 12 выходов	

## **8.2 Результаты натурных комплексных исследований экологических параметров на подспутниковом полигоне в северо-восточной части Черного моря**

Экспедиционные исследования проводились по следующим направлениям:

- 2) изучение гидрофизической и гидрохимической структуры и процессов в зависимости от метеорологических и гидродинамических условий;
- 3) исследование динамики положения верхней границы сероводородного слоя и геохимических и биохимических процессов вблизи этой границы;
- 4) определение сезонных изменений первичной продукции;

- 5) исследование динамики бактериопланктона;
- 6) исследование динамики зоо- и фито- планктонных сообществ;
- 7) исследование динамики численности и размерно-возрастной структуры гребневигов-вселенцев;
- 8) исследование репродукционной динамики *Pleurobrachia pileus*.

Работы проводились в районе Геленджикской бухты и в зоне шельфа и континентального склона Голубой бухты на изобатах 5-1500 м. В экспедиционных рейсах, направленных на исследования гидрофизических, гидробиологических и гидрохимических параметров (рейсы 1, 2а, 2б, 5, 9), работы выполнялись на 15 станциях на изобатах 5, 6, 10, 12, 25, 50, 100, 500, 1000, 1250 и 1500 м (таблица 8.2). Всего за сезон выполнено 75 станций.

Таблица 8.2 – Координаты станций

№ станции	Позиция	Широта		Долгота		Глубина, м
		Градусы	Минуты	Градусы	Минуты	
1	Бухта – центр	44	33,70	38	2,59	12
2	Бухта- Гидробаза)	44	34,60	38	1,90	6
3	(Бухта- СуАран	44	33,84	38	4,34	6
4	Внутренний шельф- 25m	44	32,88	38	1,87	25
5	Средний шельф - 50м	44	31,76	37	59,19	50
6	Внешний шельф – 100 м	44	30,84	37	58,26	100
7	Свал – 500 м	44	29,63	37	57,41	500
8	1000 м	44	28,45	37	55,96	1000
9	1200 м	44	27,43	37	54,77	1200
10	1500 м	44	26,35	37	53,66	1500
11	Свал – 500 м	44	31,21	37	54,26	500
12	Внешний шельф – 100 м	44	32,25	37	56,11	100
13	Средний шельф - 50м	44	32,92	37	57,14	50
14	Внутренний шельф- 25m	44	33,96	37	58,50	25
15	10 м	44	34,34	37	58,74	10

#### **Гидрофизические исследования.**

В рамках *гидрофизического направления* исследований производились гидрофизические зондирования CTD-зондом SBE 19plus на всех станциях с глубиной

зондирования до 330 м в районе континентального склона, на шельфовых станциях - до дна.

Краткая техническая характеристика основных измерительных средств и процесс выполнения измерений:

1) Погружаемый зонд SBE 19Plus на кассете с батометрами. Зонд измеряет вертикальное распределение температуры, электрической проводимости, растворенного кислорода, мутности морской воды в диапазоне 0-6000 м, а также pH и Eh до 1200 м. SBE 19plus укомплектован высокоточным температурно-скомпенсированным датчиком давления (Digiquartz<sup>®</sup> pressure sensor 410K), имеющим точность 0.015% на полный диапазон измерения (0-69 Мпа), двумя датчиками температуры (модели SBE 3P), имеющими диапазон измерения от -5 до 35°C, первоначальную точность 0.001°C, среднюю стабильность 0.002°C/год, постоянную времени до 0.07 с., разрешение 0.0002°C, при частоте опроса 24 гц, двумя датчиками электропроводности (модели SBE 4P) с диапазоном измерения от 0 до 7 сименс/м, первоначальной точностью 0.0003 сименс/м, средней стабильностью 0.004 сименс/м\*год, разрешением 0.00004 сименс/м, постоянной времени 0.065 с, оптическим датчиком прозрачности с длиной световой волны 880 нм, диапазоном рассеяния от 15 до 150°, чувствительностью 40 mV/FTU и постоянной времени 0.1 с, датчиком определения концентрации растворенного кислорода SBE-43, измеряющим концентрацию растворенного кислорода в любых водах с процентом насыщения кислородом не более 120% с первоначальной точностью измерений 2% от уровня насыщения, датчиком флуоресценции WetLab ECO AFL-FL с длиной световой волны 470/695 нм для измерения концентрация хлорофилла<sub>a</sub> в диапазоне 0.02-100 мкг/л с чувствительностью 0.025 мкг/л (рисунок 8.1).

Зондирования SBE 119 на кассете с батометрами производились с помощью лебедки. Скорость опускания зонда составляла от 0.5 до 1 м/с.



Рисунок 8.1 – CTD-зонд SBE 19plus на розетке с батометрами перед погружением в воду

2) Буксируемый акустический доплеровский профилограф скорости течения (ADCP). Для регистрации профиля скорости течения на ходу судна использовался акустический доплеровский профилограф RDI WorkHorse Monitor 300, размещенный в обладающей положительной плавучестью и хорошо обтекаемой гондоле таким образом, что ось прибора направлена вертикально вниз. Данная модель работает на частоте – 300 кГц, что позволяет получать данные о горизонтальных и вертикальной составляющих скорости течения в столбе воды 80-90 м под прибором.

#### **Результаты гидрофизических исследований.**

В рамках *гидрофизических исследований* проанализированы характеристики холодного промежуточного слоя (ХПС) и их сезонная изменчивость (рис. 8.2). Показано, что в результате теплой зимы вертикальное конвективное перемешивание было слабым и обновления ХПС не происходило. Вследствие этого минимальная температура вод во все месяцы с апреля по ноябрь была выше  $8.2^{\circ}\text{C}$ , а в сентябре – ноябре минимальная температура вод превышала  $8.3^{\circ}\text{C}$ . Таким образом, в соответствии с классическим определением в 2014 г. ХПС не существовал, поскольку это слой воды заключенный между изотермами  $8,0^{\circ}\text{C}$ . Такая же ситуация наблюдалась и в 2010 г.

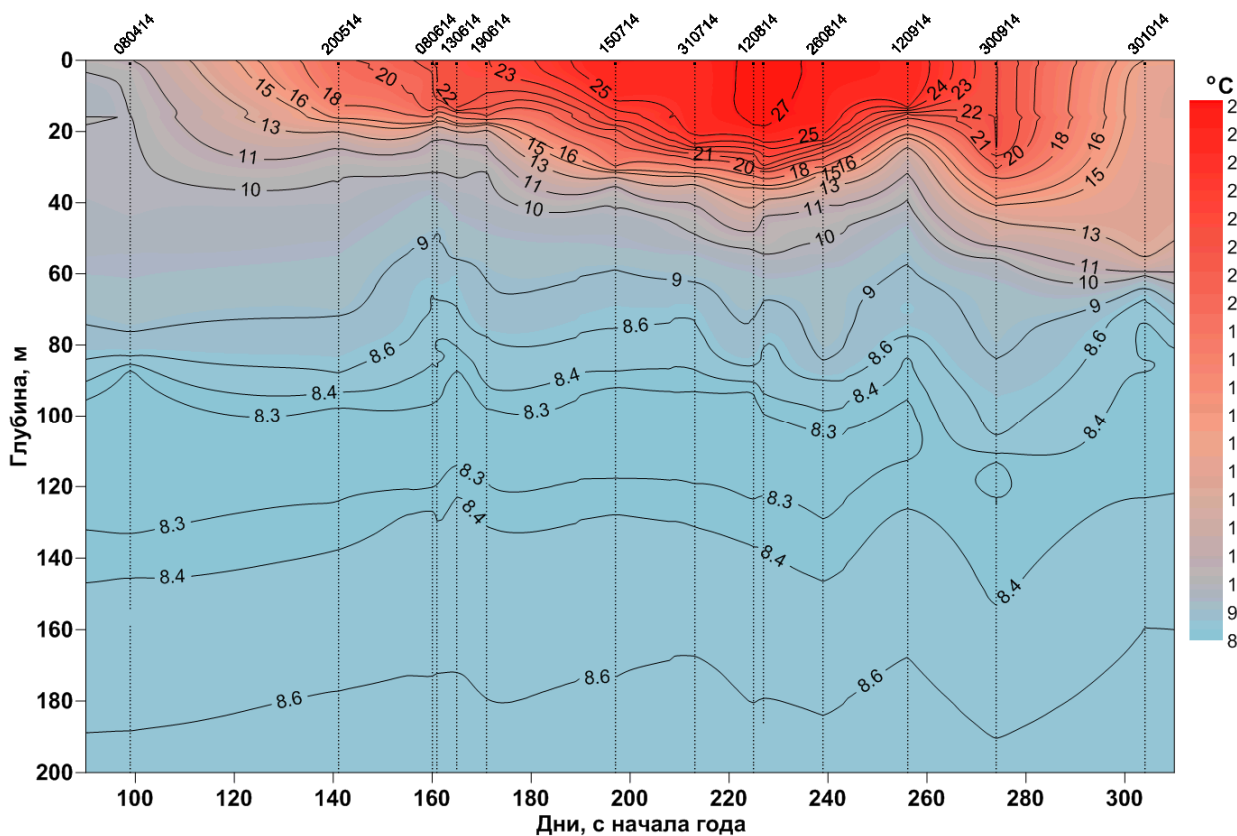


Рисунок 8.2 – Временная развертка вертикального распределения температуры воды в верхнем 200 м слое на станции с глубиной места 500 м по данным СТД-зондирований с МНИС «Ашамба»

Проведено исследование изменчивости солености вод верхнего квазиоднородного слоя прибрежной зоны Черного моря. Установлены характеристики весенне-летнего понижения солености, обусловленного повышенным речным стоком (рис. 8.3) Показано, что величина опреснения вод в определенной степени определяется суммарным количеством осадков, выпадающих на побережье в первую половину года, однако, она также зависит от интенсивности ветрового воздействия и вихревой активности, способствующей выносу опресненных вод в глубоководную часть моря.

#### Гидрохимические исследования.

В рамках *гидрохимического направления* исследований производились:

1) Отбор проб с помощью комплекса батометров Rosette на станциях на изобатах 6 м (0, 6 м), 12 м (0, 12 м), 25 м (3 горизонта – 0, 10, 25 м), 50 м (4 горизонта - 0, 10, 25, 50 м), 100 м (5 горизонтов – 0, 10, 25, 50, 70 м) и 500 м (5 горизонтов – 0, 10, 25, 50, 70 м и 8 горизонтов с глубин 110 -170 м). Всего отобрано 350 проб воды для определения гидрохимических параметров.



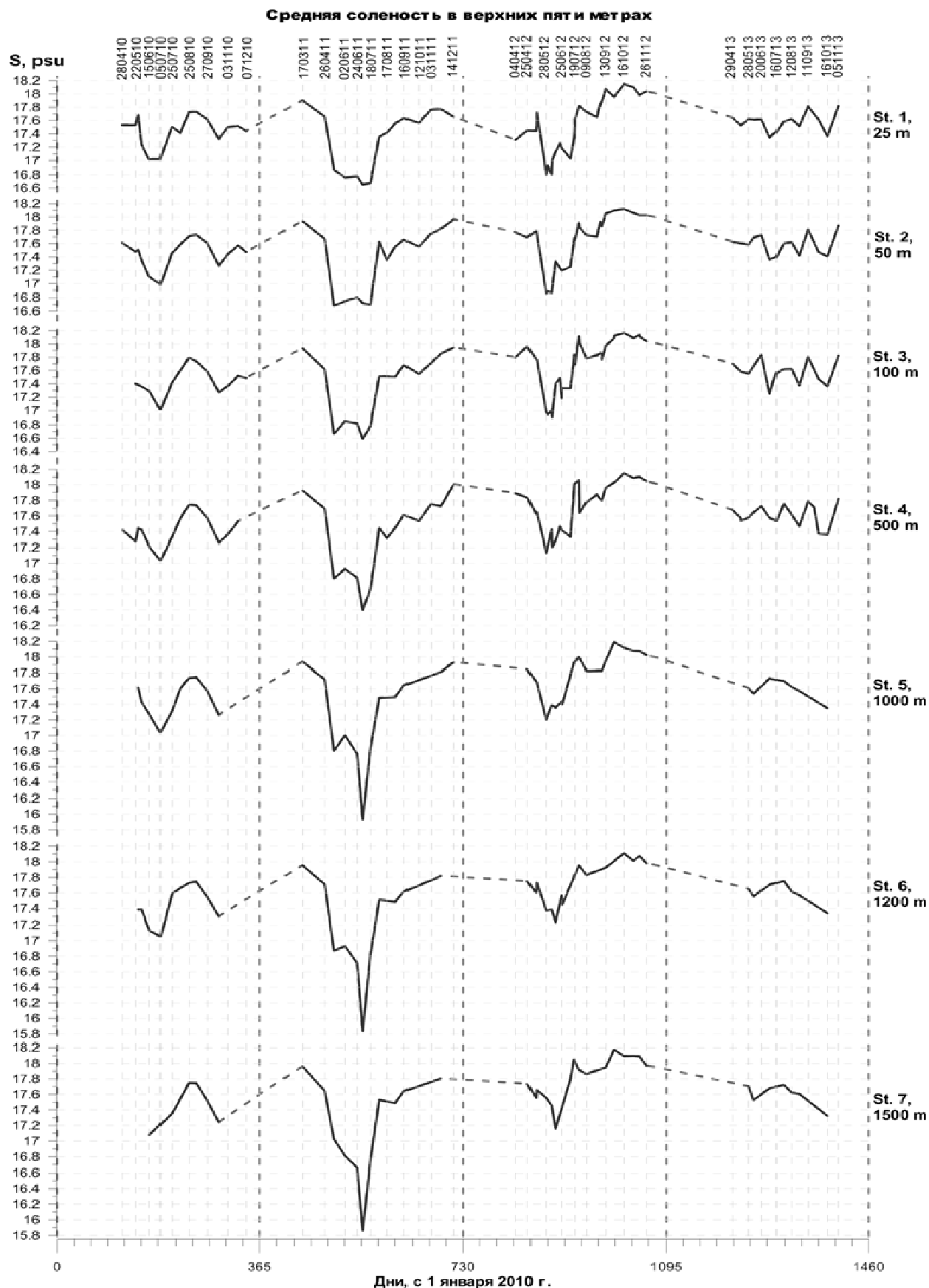


Рисунок 8.3 – Средние значения солености поверхностного 5-м слоя на семи мониторинговых станциях (глубины 25, 50, 100, 500, 1000, 1200 и 1500 м) за весь период наблюдений (2010-2013 гг.). За нуль по оси абсцисс принято начало 2010 г., пунктиром обозначены переходы к следующим годам

2) Определение в береговой лаборатории гидрохимических параметров морской воды (таблица 8.3).

Таблица 8.3 – Перечень определяемых гидрохимических параметров

	Виды исследований
1	рН
2	Щелочность
3	Кислород
4	Фосфаты
5	Нитриты
6	Нитраты
7	Аммонийный азот
8	Фосфор валовый
9	Азот валовый
10	Сероводород
11	Кремний

Отбор проб проводился пластиковыми батометрами различной ёмкости (от 1 до 10 литров) в соответствии с ГОСТ 51592-2000 «Общие требования к отбору проб». Сразу после отбора пробу переливали в посуду для хранения проб по ГОСТ 17.1.5.04-81, в зависимости от определяемого компонента. Посуда предварительно обрабатывалась кислотой, промывалась водой, дистиллированной водой и водой из отбираемой пробы.

Пробы для гидрохимических анализов отбирались из батометров сразу после поднятия последних на борт и фиксации проб на растворенный кислород и аммонийный азот. Пробы на определение рН, биогенных элементов (силикаты, фосфаты, формы азота) и щелочности отбирались в пластиковую посуду 0.5 л без консервации.

Для определения гидрохимических параметров в воде применялись следующие методики:

а) Растворенный кислород. Содержание кислорода в морской воде определялось иодометрическим методом (метод Винклера) по РД 52.10.243-92 МУ. Пробы морской воды фиксировались немедленно после отбора пробы на борту судна и помещались в темное место. Иодометрическое определение проводилось в судовой лаборатории, не позднее 8 часов после фиксации. Титр раствора тиосульфата устанавливался по стандартному раствору йодата калия ГОСТ 4202. Чувствительность метода составляет 0.02 мг/л, ошибка определения не превышает 3.4%.

б) Водородный показатель (рН). Величина рН определялась потенциометрическим методом по ПНД Ф 14.1:2:3:4.121-97. Определение величины рН проводилось в судовой лаборатории не позднее чем через 1 час после отбора пробы. Для калибровки иономера

использовались образцовые буферные растворы ГОСТ 8.135-74. Калибровка проводилась в начале каждой серии определений. Показатель точности (границы погрешности при вероятности 0.95) составил 0.2 ед.рН. Данные измерений приводились к условиям *in situ* по соответствующим уравнениям для практической шкалы NBS.

в) Общая титруемая щелочность. Определение общей титруемой щелочности (щелочности) проводилось методом прямого титрования (метод Бруевича) с визуальным определением точки конца титрования. Определение проводилось в судовой лаборатории не позднее чем через сутки со времени отбора. Для калибровки метода применялись СО (стандартные образцы) массовой концентрации гидрокарбонат ионов ГСО 8403-2003. Предел чувствительности определения составлял 0.005 мг-экв/л, суммарная погрешность определения –2 %.

д) Растворенный фосфор. Определение содержания растворенного неорганического фосфора (фосфаты) проводилось колориметрически по модифицированному методу Морфи и Райли в соответствии с ПНД Ф 14.1:2.112-97. Определение проводилось в судовой лаборатории не позднее чем через 12 часов со времени отбора. Для калибровки метода применялись СО массовой концентрации фосфат ионов ГСО 7791-2000. Предел чувствительности определения элемента составлял 0.0005 мг/л. Показатель точности (границы погрешности при вероятности 0.95) 10%.

е) Общий фосфор. Определение общего (валового) фосфора проводилось методом мокрого сжигания с персульфатом калия по РД 52.10.243-92. Определение проводилось в судовой лаборатории не позднее чем через сутки со времени отбора. Для калибровки метода применялись СО массовой концентрации фосфат ионов ГСО 7791-2000. Предел определения содержания фосфора составлял 0.03 мг/л, суммарная погрешность определения – 12 %.

ж) Растворенный неорганический кремний (силикаты). Для определения кремния использовался метод Динерта-Ванденбульке в желтой модификации (длина волны 380 нм) и модификации Королева с образованием голубого кремнемолибденового комплекса, в соответствии с РД 52.10.243-92. Определение проводилось в судовой лаборатории не позднее чем через 12 часов со времени отбора. Для калибровки метода применялись СО массовой концентрации силикат-ионов ГСО 8212-2002. Предел чувствительности определения элемента составлял 0.0005 мг/л, суммарная погрешность определения – 5.8 %.

и) Нитритный азот. Определение нитритного азота (нитриты) проводилось колориметрически по ПНД Ф 14.1:2:3-95. Определение проводилось в судовой лаборатории не позднее чем через 12 часов со времени отбора. Для калибровки метода применялись СО массовой концентрации нитрит ионов ГСО 7862-2000. Предел чувствительности

определения элемента составлял 0.0005 мг/л, Показатель точности (границы погрешности при вероятности 0.95) от 6 до 25%.

к) Нитратный азот. Определение нитратного азота (нитраты) проводилось колориметрически после его восстановления на кадмиевых колонках до нитритного азота по РД 52.10.243-92. Определение проводилось в судовой лаборатории не позднее чем через 12 часов со времени отбора. Для калибровки метода применялись СО массовой концентрации нитрат ионов ГСО 7863-2000. Предел чувствительности определения элемента составлял 0.005 мг/л, суммарная погрешность определения – 7.4 %.

л) Аммонийный азот. Определение аммонийного азота (ион аммония) проводилось колориметрически, фенолят гипохлоридным методом. Определение проводилось в судовой лаборатории не позднее чем через 12 часов со времени отбора. Для калибровки метода применялись СО массовой концентрации ионов аммония ГСО 7864-2000. Предел чувствительности определения элемента составлял 0.0005 мг/л, суммарная погрешность определения – 12 %.

м) Общий азот. Определение общего (валового) азота проводилось методом мокрого сжигания с окислительным реактивом. Определение проводилось в судовой лаборатории не позднее чем через сутки со времени отбора. Для калибровки метода применялись СО трилона Б (ГОСТ 10652), приготовленные в Лаборатории биогидрохимии ИОРАН. Предел определения содержания азота и составлял 0.03 мг/л, суммарная погрешность определения – 12 %.

#### **Результаты гидрохимических исследований.**

В рамках *гидрохимического направления* исследований выполнены исследования состояния загрязненности воды и донных отложений техногенными веществами: нефтепродукты (НП), фенолы, АПАВ, тяжелые металлы (ТМ - Fe, Cu, Zn, Pb, Cd, Hg, Mn), ХОП и бенз(а)пирен в Геленджикской бухте и на акватории гидрофизического полигона (рис. 8.4). Устойчивое превышение ПДК в воде, наблюдается только по содержанию свинца. Выше нормы зафиксированы отдельные максимальные значения за весь период наблюдений для – марганца, фенола, меди, АПАВ. Превышения ПДК зафиксированы для фенолов, меди, АПАВ – на одной станции, для содержания марганца – в 4-х пробах. Остальные изученные техногенные загрязнения находились в воде в концентрациях ниже норм ПДК. Для донных отложений Геленджикской бухты характерны пониженные величины содержания техногенных загрязнений. Наблюдаются локальные превышения ПДК по содержанию нефтепродуктов на отдельных станциях.

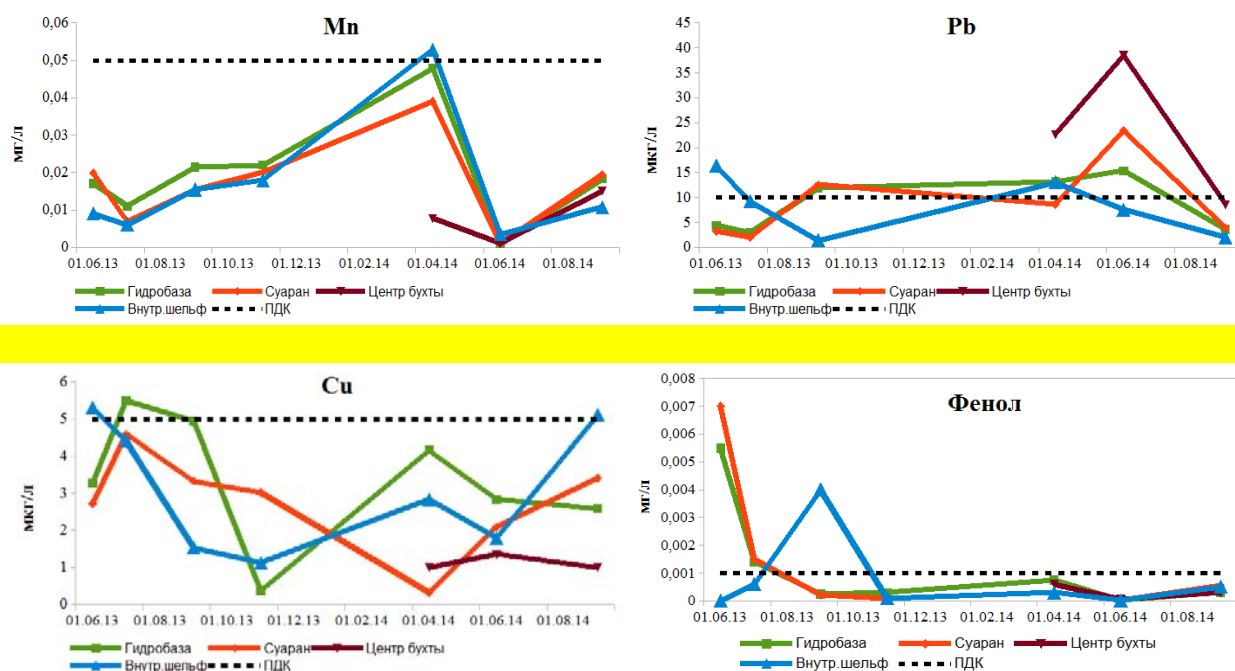


Рисунок 8.4 – Концентрация тяжелых металлов (марганца, свинца и меди), а также фенола в прибрежных водах Черного моря в районе г. Геленджик в 2013-14 гг. по данным судового мониторинга

#### Гидробиологические исследования.

В рамках *гидробиологического направления* исследований производились следующие работы:

1) Тотальные сетные ловы мезо- и макрозоопланктона на станциях 16, 25, 50, 100 и 500 м с целью изучения изменчивости структуры и функциональных параметров планктонного сообщества при сезонных изменениях биотических и абиотических факторов среды: гидрофизических, гидрохимических, пресса хищников, кормовой базы и внутри- и межпопуляционных взаимодействий гребневиков-вселенцев.

2) Отбор проб первичной продукции из батометров на изобатах 6-1, 6-2, 12, 25, 50, 100 и 500 м на горизонтах, указанных для гидрохимических работ.

3) Отбор проб фитопланктона и бактериопланктона из батометров на станциях на изобатах 6-1, 6-2, 12, 25, 50, 100 и 500 м на горизонтах, указанных для гидрохимических работ.

4) Определение прозрачности воды с помощью диска Секки на станциях на изобатах 25, 50, 100 и 500 м.

Вертикальные ловы зоопланктона производили сетями Джеди и КБ от дна до поверхности на шельфе (станции на изобатах 10, 16, 25, 50 и 100 м) и в слое от 200 м глубины до поверхности на склоне (изобата 500 м). Сетью Джеди проведено 60 ловов, сетью КБ (Конус Большой) – 72 ловов. Итого всего 132 сетных лова. Измерения

макрозоопланктона производились на борту судна, непосредственно после лова. Пробы мезопланктона фиксировались формалином на борту судна непосредственно после их отбора, а затем частично просматривались в береговой лаборатории.

Пробы бактериопланктона фиксировались формалином на борту судна, и в дальнейшем обрабатывались и анализировались в береговой лаборатории. Всего 115 проб. Пробы фитопланктона фиксировались формалином на борту судна и в дальнейшем обрабатывались и анализировались в береговой лаборатории. Всего 115 проб.

Для определения содержания хлорофилла «а» в воде пробы объемом ~ 500 мл фильтровали через стекловолокнистые фильтры марки GF/F фирмы Whatman под вакуумом при разряжении 0.3 атм. После фильтрации фильтры высушивали при комнатной температуре в течение 3 – 4-х часов. Экстрагирование проводили 90%-ым водным раствором ацетона в течение суток. Определение содержания хлорофилла “а” проводили флуориметрическим методом.

#### **Результаты гидробиологических исследований.**

В рамках *биологического направления* исследований проанализирована изменчивость индекса трофности вод TRIX в Геленджикской бухте и на мониторинговом разрезе на акватории геленджикского полигона ИОРАН в 2007-2009 и 2013-2014 гг. (рис. 8.5). Установлено, что в последний период времени он несколько уменьшился по сравнению с первым, что свидетельствует об уменьшении уровня эвтрофикации вод. Наблюдается некоторое повышение значения этого индекса по мере приближения к берегу, однако это повышение не изменяет оценки благополучного статуса прибрежной черноморской экосистемы по данному параметру ( $TRIX < 4$ ).

**Выводы.** Натурные комплексные исследования экологических параметров на подспутниковом полигоне в северо-восточной части Черного моря проведены в летне-осенний период 2014 г. в полном соответствии с Программой и методикой исследований. Для каждого биологического сезона определены основные характеристики распределения и численности доминирующих групп фито-, зоо- и бактериопланктона, величин первичной продукции и хлорофилла «а» на подспутниковом полигоне. Описана гидрохимическая структура вод на подспутниковом полигоне для летнего и осеннего сезона 2014 г. Исследована гидродинамическая структура района «шельф-континентальный склон» на подспутниковом полигоне. Сформированы массивы данных натурных исследований для использования при верификации спутниковых данных и алгоритмов, а также верификации математических моделей гидродинамики и распространения примесей.



Рисунок 8.5 – Изменения значений индекса трофности TRIX на геленджикском полигоне в разные годы (а) и на разрезе от Геленджикской бухты, осредненные для трех лет наблюдения (2009, 2013-2014) (б)

## 9 ПРИОБРЕТЕНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО РАЗМЫКАТЕЛЯ ДЛЯ ЗАЯКОРЕННЫХ АВТОНОМНЫХ СТАНЦИЙ (РАБОТА ИНДУСТРИАЛЬНОГО ПАРТНЕРА)

Акустический размыкатель — это устройство, предназначенное для постановки оборудования на морское дно, и затем возврата этого оборудования на поверхность, после получения команды по акустическому каналу связи или по истечении заданного интервала времени.

Процесс установки: Собирается вся связка инструментов, либо орудий лова для установки на морское дно. Связка содержит в общем случае: полезную нагрузку, плавучесть, якорный груз и собственно акустический размыкатель. Все это последовательно соединено тросом. Связка стравливается в воду и устанавливается на морском дне. По команде от устройства управления акустический размыкатель имеет возможность разорвать механическое соединение с якорным грузом, и плавучесть поднимет на поверхность полезную нагрузку, при этом якорный груз останется на дне.

Процесс работы: Вся связка находится под водой, полезная нагрузка на глубине, определяемой длиной троса и общей глубиной места. Время нахождения под водой определяется задачей, которую выполняет полезная нагрузка размыкателя. Типичное максимальное время работы акустического размыкателя от нескольких месяцев до года.

Процесс извлечения: По команде устройства управления акустический размыкатель разрывает механическое соединение с якорным грузом и вся связка, за исключением якоря поднимается на поверхность. Обычно устройство управления находится на корабле, но возможными носителями могут быть так же водолазы, либо подводные обитаемые (необитаемые) аппараты. Некоторые акустические размыкатели оборудованы емкостями для троса, один конец которого соединен с якорным устройством. При расцеплении с якорной частью связки, трос из этих емкостей стравливается, а вся связка поднимается на поверхность. Затем, после всплытия, используя высвободившийся трос, поднимается на поверхность и якорное устройство.

Гидроакустические размыкатели производства компании InterOcean предназначены для размыкания троса в подводных объектах (профилограф на буйковой станции, донные станции). Срабатывание размыкателя происходит по адресной команде, подаваемой дистанционно с вызывного устройства. Размыкатель может использоваться также и в автономном режиме для размыкания троса буйковых станций различного типа и рассоединения других узлов устройств, находящихся в подводном положении.

Гидроакустические размыкатели входят в состав комплекта постановочно-выборочного оборудования донной станции, обеспечивающей мультидисциплинарные



океанологические исследования и мониторинговые измерения на морском шельфе и континентальном склоне до глубины 1000 м.

Для гидроакустических размыкателей InterOcean характерны лучшие эксплуатационные свойства, обеспечивающие успешное и эффективное решение задач ПНИ:

- высокая коррозионная устойчивость: размыкатели, выпущенные 10 лет назад, до сих пор работают,
- защита от обрастания с помощью специального механизма размыкателя,
- прочность, надежность, низкое потребление энергии,
- длинная продолжительность жизни батарей: литиевые до 2,5 лет,
- высокая защищенность - уникальные командные коды,
- полный контроль с борта судна за состоянием размыкателя под водой: дальность, подтверждение приема команд, состояние батарей, наклон, режим маяка, функция срабатывания через определенный временной интервал

Технические характеристики гидроакустического размыкателя InterOcean 1090E (рис. 9.1):

- размыкатель в двойном корпусе рабочей глубиной 1500 м и дальностью ответа 10 км.
- максимальный срок постановки 18 месяцев.
- максимальная нагрузка – 4600 кг, нагрузка на крюк – 3000 кг.
- вес в воздухе 11 кг, вес в воде 7 кг.



Рис. 9.1 – Гидроакустический размыкатель InterOcean 1090E.

Гидроакустический размыкатель InterOcean 1090E был приобретен на средства Индустриального партнера ООО СФ «Нерей» на основании Договора № 09/14 от 09 апреля 2014 г. и передан ИО РАН для использования при проведении ПНИ согласно Соглашения № 14.604.21.0044 о предоставлении субсидии от 23 июня 2014 г.

## 10 РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ И МЕТОДИКИ НАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ АВТОНОМНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ НА ПОДСПУТНИКОВОМ ПОЛИГОНЕ В ШЕЛЬФОВО-СКЛОНОВОЙ ЗОНЕ ЧЕРНОГО МОРЯ

Разработка программ является самостоятельным видом исследований, предшествующий проведению эксперимента и направленный на поиск наиболее эффективных путей решения поставленных в работе задач, на успешное достижение цели настоящего ПНИ – создание научно-технического задела в области технологии мониторинга и краткосрочного прогнозирования экологического состояния акватории морского шельфа Черного моря на основе спутниковых и контактных измерений и высокоразрешающей численной модели циркуляции моря. В программе обозначены цели и задачи натурных измерений с помощью автономных измерительных комплексов на подспутниковом полигоне, теоретическое обоснование исследований. Дано описание технических средств, необходимых для выполнения работ, технологий и методов проведения измерений, определены направления их дальнейшего развития. Представлен план выполнения работ организации и проведения измерений.

От качества контактных измерений зависит достоверность интерпретации спутниковых данных, точность расчетов верифицированных по результатам натурального эксперимента численных моделей. В программе определены пути совершенствования приборной базы подспутникового полигона, технологий контактных измерений, направленные на повышение точности и достоверности определения параметров морской среды.

### **10.1 Концептуальная основа Программы**

Натурные измерения параметров морской среды с помощью автономных измерительных комплексов на подспутниковом полигоне должны быть направлены на решение основной задачи – обеспечивать калибровку и верификацию спутниковых данных с целью дальнейшей разработки и усовершенствования методов дистанционного изучения и оценки состояния морской среды на больших акваториях в течение длительного времени.

Спутниковое наблюдение (мониторинг) за состоянием морских акваторий относится к числу наиболее сложных задач дистанционного зондирования – как в силу сложности, многофакторности и трехмерности происходящих в море процессов, так и из-за больших размеров акваторий, которые необходимо охватить регулярными наблюдениями. Процессы, происходящие в морской среде, высокодинамичны, а их изменчивость достаточно высока – как по диапазону значений, так и по скорости изменения параметров морской среды. В

результате этого повторяемость (стабильность) явлений, наблюдаемых на морских акваториях, оказывается недостаточной для интерпретации происходящих процессов только путем накопления ретроспективной информации в тех или иных базах данных и ее прямого использования в интересах анализа и прогноза. В силу этой специфики морские подспутниковые измерения и исследования должны опираться на комплексный мультидисциплинарный подход, включающий в себя проведение одновременных исследований объектов и процессов различной природы (физической, химической, биологической, географической), в том числе и антропогенные воздействия. Такой сложный комплексный подход требует тщательной проработки согласованности применяемых методов измерения параметров морской среды с помощью автономных измерительных комплексов.

## **10.2 Исходная информация для разработки Программы**

Проект направлен на решение одной из важнейших задач устойчивого развития современного общества – научно-технического обеспечения организации рационального природопользования, основанного на эффективном экологическом мониторинге состояния природной среды. Масштабные проекты нефтегазодобычи, имеющие общегосударственное значение, в XXI веке начали осуществляться на шельфе Каспийского и Охотского морей. Строятся и проектируются новые народнохозяйственные объекты в российской части Арктики. Компания «Роснефть» ведет изыскания и разработку технологий в целях глубоководного бурения в Черном море, в том числе на Туапсинском лицензионном участке. Ясно, что бесконтрольно, без оценки воздействий хозяйственной деятельности на природную среду бурение морского дна проводить нельзя. Слишком высока цена, которую придется заплатить за загрязнение акватории в случае техногенной аварии. Даже в условиях безаварийной работы хозяйственных объектов на морском шельфе нужно заранее просчитать и смоделировать процессы в акваториях, подверженных негативным воздействиям. А начинать надо с налаживания системы гидрометеорологических наблюдений и экологического контроля за зоной морского шельфа. Ввиду протяженности российского шельфа, приоритет должен быть отдан спутниковым средствам экологического мониторинга акваторий. Причем спутниковые дистанционные наблюдения из космоса должны опираться на несколько морских подспутниковых наблюдательных полигонов, на которых отрабатываются методы и калибруются данные спутниковых измерений с учетом региональных и климатических особенностей. Прежде всего, это относится к Азово-Черноморскому бассейну – по существу, единственной морской

рекреационной зоне России, огромные инвестиции в которую не должны быть перечеркнуты из-за многочисленных рисков загрязнений морского шельфа.

Активные исследования на Черном море ИО РАН проводит с момента создания в 1949 г. Черноморской научно-исследовательской станции (ЧЭНИС), преобразованной в 1967 г. в Южное отделение Института океанологии имени П.П. Ширшова РАН (ЮО ИО РАН). В начальный период основным направлением деятельности были отработка и усовершенствование экспериментально-методической базы проведения гидрофизических исследований. Основу исследований составляли судовые экспедиционные работы, в ходе проведения которых внимание уделялось усовершенствованию приборов, методик и технологий проведения эксперимента, определению погрешностей измерений.

Современный этап работ связан с развертыванием в 2011-2012 гг. экспериментального подспутникового полигона в шельфово-склоновой зоне г. Геленджика и обеспечением его непрерывного функционирования. Работы выполнялись в рамках гранта РФФИ 09-05-13527\_офи\_ц., а также Государственного контракта с Минобрнауки РФ № 11.519.11.5020 «Черноморский экспериментальный подспутниковый полигон в целях мониторинга состояния и исследования прибрежной экосистемы». На акватории полигона, на разном расстоянии от берега и различной глубине места (от 20 до 250 м) установлено 6 автономных станций, осуществляющих измерение гидрофизических параметров (температура, соленость, плотность воды, скорость течения, концентрация взвешенного вещества) практически во всей водной толще в месте постановки станции. Для обеспечения полигона регулярной метеорологической информацией налажено получение данных метеостанции г. Геленджика. На акватории полигона осуществляется проведение регулярных судовых исследований, включающих в себя комплекс гидрофизических, гидрохимических и биологических исследований. Эти исследования в значительной степени опираются на информацию об «абиотическом фоне», которую дают автономные станции, а также высококачественные спутниковые данные в ИК (температура поверхности моря) и видимом диапазоне (концентрация хлорофилла «а», яркость восходящего излучения) электромагнитного спектра.

Выбор направлений и методических подходов исследований по разрабатываемой Программе основывается на результатах предыдущих исследований на акватории подспутникового полигона ИО РАН за последние 12 лет. Эти исследования проводились по следующим тематикам:

1) развитие макро- и мезомасштабной динамики вод под влиянием изменчивости ветра (грант РФФИ 02-05-65154-а);

- 2) исследование процессов обмена в верхней части черноморского пикно-халоклина (грант РФФИ 05-05-64927-а);
- 3) исследование водообмена между шельфом и глубоководной частью моря как фактора обновления и самоочищения вод у побережья Краснодарского края (грант РФФИ 06-05-96672-р\_юг\_а);
- 4) взаимодействие разномасштабных гидрофизических процессов в шельфово-склоновой зоне моря (грант РФФИ 08-05-00183-а);
- 5) взаимодействие крупномасштабной циркуляции и мезомасштабной динамики моря в связи с климатом (грант РФФИ 09-05-92501-ИК\_а);
- 6) изучение гидрофизических процессов, определяющих тонкую структуру вертикального распределения кислорода в море (грант РФФИ 10-05-01091-а);
- 7) процессы формирования гидрологического климата шельфовой зоны Черного моря (грант РФФИ 10-05-00689-а).
- 8) технологии многоуровневого регионально-адаптированного экологического и геодинамического мониторинга морей Российской Федерации в первую очередь районов шельфа и континентального склона (ФЦНТП № РП–22.1/001);
- 9) технологии защиты портов и морских каналов от заносимости, оценки влияния портового строительства на окружающую среду (ФЦП «Модернизация транспортной системы России», подпрограмма «Морской транспорт»);
- 10) технологии автономного профилирования водной толщи на заякоренной буйковой станции в целях изучения изменчивости морской среды и биоты (грант РФФИ 06-05-08092-офи);
- 11) система геодинамического и экологического мониторинга (договор ИО РАН с «ЛУКОЙЛ-ВолгоградНИПИморнефть», №4350 РД с/п, 2007 г.),
- 12) макет измерительного комплекса для оперативного мониторинга морской среды в водах шельфово-склоновой зоны (грант РФФИ 08-05-12046-офи\_ц);
- 13) макет гидрометеорологического полигона на шельфе Черного моря для изучения реакции морской среды на атмосферные воздействия и климатические изменения с помощью комплекса автоматизированных измерительных средств (грант РФФИ 09-05-13527-офи\_ц).

По результатам исследований проанализирована пространственно-временная изменчивость гидротермодинамических процессов в Чёрном море. Проведена оценка содержания минеральных и органических форм биогенных элементов в прибрежной зоне моря в 2003-2013 гг. Рассмотрена межгодовая изменчивость в течение этого периода, выполнено сравнение биогенного режима между различными акваториями.

На основе анализа данных многолетних физических и биологических наблюдений было проанализировано влияния режима циркуляции вод в прибрежном районе Черного моря на характер кросс- и вдоль- шельфового переноса. Было показано, что режим с доминированием быстрой, прижатой к склону, струи Основного Черноморского течения (ОЧТ) характеризуется затрудненным кросшельфовым водообменом, в то время как "волно-вихревой" режим с угасающим и распадающимся ОЧТ способствует переносу взвешенного материала от берега в открытое море и увеличивает вентиляцию прибрежных районов.

Очевидно, что дальнейший прогресс в понимании закономерностей развития экосистемы Черного моря в значительной степени зависит от активности в проведении фундаментальных и прикладных исследований, от развития новых подходов, привлечения современных методов и расширения арсенала средств исследований, выполняемых в рамках общей долговременной стратегии. Это необходимо не только для получения принципиально новых результатов в комплексных черноморских исследованиях, но и для эффективного развития того задела, который был создан в исследовании Черного моря как единой природной системы.

Фундаментальный подход к комплексному исследованию экосистемы Черного моря должен основываться на двух основных принципах:

а) перманентного контроля ключевых параметров состояния морской среды и биоты, а также факторов внешнего воздействия (естественного и антропогенного) на экосистему;

б) мультидисциплинарного изучения закономерностей функционирования и современной динамики различных (биотических и абиотических) составляющих морской экосистемы и функциональных взаимосвязей между ними в условиях изменяющегося внешнего воздействия климатических и антропогенных факторов.

Указанные принципы заложены в основу программы натурных комплексных исследований экологических параметров Черноморского на подспутниковом полигоне.

### **10.3 Цель и основные задачи Программы**

Выделив особенность спутниковых наблюдений и подспутниковых исследований на морских акваториях, в первую очередь в прибрежных (шельфово-склоновых) зонах морей России, мы сформулировали основную цель Программы – провести измерения ведущих параметров морской среды в шельфово-склоновой зоне Черного моря в районе существующего подспутникового полигона ИО РАН в районе г. Геленджик с целью получения необходимых данных для разработки и верификации регионально

адаптированных алгоритмов и методик использования результатов спутниковых наблюдений.

Достижение поставленной цели обусловлено решением следующих конкретных задач:

- разработка, реализация опытных средств и методов мониторинга физических параметров водной среды морского шельфа на подспутниковом полигоне с помощью автономных измерительных комплексов;

- сбор, обработка и анализ гидрологических параметров морской среды, данных исследований структуры течений в точках постановки приборных комплексов, необходимых для верификации региональных прогностических моделей;

- сбор и анализ данных контактных исследований, необходимых для интерпретации результатов спутниковых измерений.

#### Состав натуральных измерений с помощью автономных измерительных комплексов

1) Исследования изменчивости гидрологической структуры, динамики вод участка шельфового склона Северо-Кавказского побережья Черного моря автоматизированной заякоренной станцией с зонд-профилографом «Аквалог» - в течение года.

2) Исследования гидродинамической изменчивости на участке шельфа Северо-Кавказского побережья Черного моря автоматизированными донными станциями в составе доплеровских измерителей течений AWAC, SonTek, ADCP WH-600 – в течение года.

3) Исследования временной изменчивости вертикального распределения температуры морской воды на участке шельфа Северо-Кавказского побережья Черного моря автоматизированными донными станциями в составе термокос №№ 1-3 – в течение года.

#### Состав методических и технологических исследований

1) Испытания системы передачи данных зонда-профилографа “Аквалог” на береговой пункт приема информации для обеспечения возможность оперативного приема контрольных параметров работы «Аквалога».

2) Апробация методики постановки и снятия донных станций в составе термокос с использованием размыкателей на якорных системах, упрощающих процедуру поиска донных станций.

3) Апробация методики поиска места установки донной станции (до глубин 25 м) водолазным способом.

4) Выполнение подготовительных работ для реализации в дальнейшем методики передачи данных в режиме реального времени по оптоволоконному кабель-каналу.



## 10.4 Характеристика района исследований

### 10.4.1 Географическое положение подспутникового полигона

Натурные исследования будут проводиться в зоне морского шельфа российского сектора Черного моря на базе Южного отделения Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (ЮО ИОРАН, г. Геленджик) на гидрофизическом полигоне, развернутом в 2011-2012 гг. Гидрофизический полигон представляет собой многопрофильный комплекс, объединяющий в себе набор средств измерений, обработки, накопления и передачи данных, соответствующую им информационную инфраструктуру, комплекс технических средств обеспечения, включая судовые и стационарные средства, определенную производственную и бытовую инфраструктуру, здания и сооружения, финансовое обеспечение и т.д., а также людские и интеллектуальные ресурсы, архивы и банки данных, методики организации научно-экспериментальных работ и т.п.

Полигон размерами ~10x10 км развернут в зоне морского шельфа северо-восточной части Черного моря в районе г. Геленджика. С северо-западной части он ограничен створом Голубой (Рыбацкой) бухты, с юго-восточной – створом Толстого мыса Геленджикской бухты (рисунок 10.1).

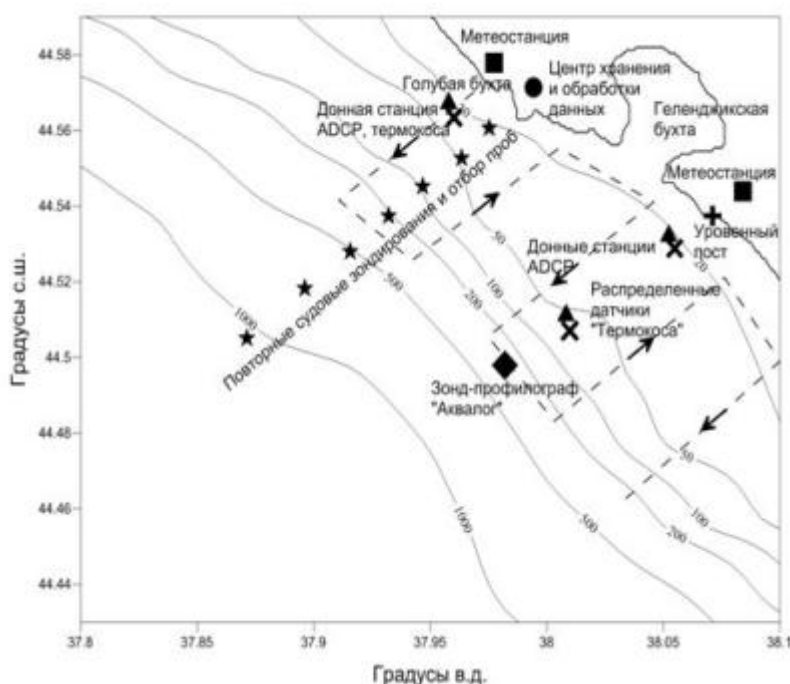


Рисунок 10.1 – Схема постоянно действующего гидрофизического полигона: квадрат – метеостанции; треугольник – донные станции ADCP; крест – термокосы; ромб – зонд-профилограф «Аквалог». Звездочками обозначены станции судовых мониторинговых наблюдений, включающих STD – зондирования. Пунктирной линией со стрелками обозначены галсы судна при проведении измерений поля скорости течения с помощью буксируемого за судном ADCP

#### 10.4.2 Гидродинамические условия района исследований

Гидрологический режим и экологическое состояние прибрежной шельфовой зоны Черного моря определяется многими внешними факторами и, прежде всего, динамикой вод, главным элементом которой является Основное Черноморское течение (ОЧТ). В свою очередь интенсивность ОЧТ зависит от крупномасштабного ветрового форсинга, которое в литературе получило название экмановской накачки. В период его ослабления течение замедляется и начинает меандрировать, формируя мезомасштабные вихревые структуры, играющие важную роль в процессах «самоочистки» прибрежной зоны от поступающих с берега загрязнений. Вдольбереговое перемещение мезомасштабных вихрей являются наиболее вероятной причиной выявленных с помощью зонда-профилографа «Аквалог» интенсивных колебаний положения перманентного пикно-халоклина (14.4 -16.2 усл. ед.), с характерным периодом 5-10 суток [25]. Такая короткопериодная перестройка гидрологической структуры сопровождается интенсивной адвекцией вод, их вертикальным и горизонтальным перемешиванием и оказывает значительное влияние на гидрохимическую структуру, потоки биогенных и загрязняющих веществ.

Определяющее влияние ОЧТ и мезомасштабных структур на динамику прибрежных вод относится к традиционным представлениям. Исследования последних лет дали основание полагать, что механизмы формирования течений, вихрей в прибрежной шельфовой зоне значительно сложнее, чем это следует из “традиционных” схем циркуляции моря. Шельфовая зона характеризуется собственными короткопериодными модами пространственно-временной изменчивости. Вблизи берега на шельфе значительную часть времени присутствуют субмезомасштабные вихри – как циклонические, так и антициклонические, диаметр которых изменяется в пределах первого десятка километров, а время их жизни – от нескольких часов до нескольких суток. Вопросы их влияния на формирование гидрологической структуры, на динамику и перенос антропогенных загрязнений остаются малоизученными и требуют дальнейших исследований.

Короткопериодная перестройка гидрологической структуры также связана с локальной неоднородностью действия ветра, ветро-волновым перемешиванием, процессами апвеллинга-даупвеллинга. В настоящее время неизвестно, какую относительную роль в этой перестройке играют определяющие факторы, как они соотносятся и взаимодействуют друг с другом, неизвестны временные масштабы реакции шельфовой зоны на внешнее воздействие, закономерности трансформации структуры вод на разном расстоянии от берега.

## **10.5 Разработка методики натуральных измерений с помощью автономных измерительных комплексов на подспутниковом полигоне**

### **10.5.1 Определение принципиальной схемы методики**

При разработке методики проведения натуральных измерений с помощью автономных измерительных комплексов на подспутниковом полигоне учитывалась сложность морских природных комплексов и процессов, в них происходящих. Пространственно-временные параметры состояния и изменчивости морской среды можно достоверно исследовать и осуществлять мониторинг только при использовании современных технических средств океанологических исследований, таких как автономные заякоренные буйковые и донные станции. При проведении натуральных экспериментов предполагается отработка методов измерений с помощью следующих автономных измерительных комплексов:

- 1) автоматический зонд-профилограф «Аквалог» на заякоренной буйковой станции;
- 2) донные станции с акустическими доплеровскими профилографами течений (ADCP, AWAC, SonTek), в том числе с функцией измерения поверхностного волнения;
- 3) гирлянды термодатчиков (термокосы) на заякоренных буйковых станциях.

### **10.5.2 Характеристика зонд-профилографа «Аквалог»**

В качестве основного инструмента для стационарных совместных измерений профилей скорости течения и гидрологической структуры используется расположенный на заякоренной буйковой станции измерительный комплекс – зонд-профилограф «Аквалог».

Он автоматически сканирует водную среду по вертикали и измеряет при этом профили температуры, солености, плотности вод и горизонтальные компоненты скорости течения с разрешением 1-2 м по вертикали. Этот комплекс включает в себя носитель с расположенной на нем измерительной аппаратурой (СТД-зонд, трехкомпонентный акустический доплеровский измеритель течений, опционально датчиками определения химических параметров и др.), который по заданной программе перемещается по тросу, натянутому между подповерхностной плавучестью и донной якорной системой. Измеряемые параметры записываются в память прибора и в режиме квазиреального времени могут передаваться на береговую станцию приема с помощью поверхностного радиобуя или модулей мобильной/спутниковой связи.

Комплекс «Аквалог» разработан ИО РАН и малым инновационным предприятием ООО «Аквалог» и предназначен для мультидисциплинарных океанологических исследований и мониторинговых измерений на морском шельфе и континентальном склоне до глубины 1000 м. Он имеет энергетический ресурс, достаточный для долговременного (3-6 месяцев) профилирования водной толщи в программируемом режиме. Суммарная длина

вертикальных перемещений «Аквалог» при номинальной емкости источника питания составляет около 400 км в отсутствие сильных течений. При наличии сильных течений (0.5–1.0 м/с) суммарная длина перемещений может уменьшиться до 200-250 км.

В состав заякоренного мобильного профилирующего аппарата «Аквалог» входит:

1) автономный профилирующий носитель измерительной техники, укомплектованный измерителем температуры, солености и давления SBE 52CTD с датчиком кислорода SBE 43F, измерителем скорости течения и обратного акустического рассеяния на взвеси Nortek Aquadopp.

2) постановочно-выборочное оборудование в составе якорного балласта, комплекта автономного гидроакустического размыкателя InterOcean Model 111, ходового буйреп длиной 250 м.

Буйковые постановки с аппаратом Аквалог проводятся ежегодно в 4 этапа в примерные сроки: январь-март, апрель-июнь, июль-сентябрь, октябрь-декабрь. Сроки уточняются в рабочем порядке в зависимости от конкретных погодных условий.

### **10.5.3 Характеристика донной станции с акустическими доплеровскими профилографами течений**

Акустические доплеровские профилографы течений предназначены для измерения течений, сигнала обратного акустического рассеивания (количества взвеси в воде), опционально волнения, уровня моря.

В состав донных станций гидрофизического полигона входит акустический доплеровский профилограф скорости течения с функцией измерения волнения ADCP AWAC Continental 1000 кГц фирмы Nortek. Данное оборудование ранее эксплуатировалось ИО РАН для проведения морских измерений, доказало свою надежность и высокие технические и эксплуатационные характеристики.

Для исследования структуры течений глубоководной части шельфа (глубина 85 м) используется доплеровский акустический профилограф ADP SonTek (фирмы YSI Environmental Company, США). Рабочая частота профилографа 250 кГц, что позволяет производить измерения течений в диапазоне глубин 5-180 м.

На полигоне используется донная станция с ADCP RDI WH 600 кГц (фирмы RDI Teledyne Co., США) с функцией измерения характеристик поверхностного волнения, расположенная на глубине 22 м на траверзе Голубой бухты на расстоянии около 900 м от конца причала (рисунок 10.1). В июне 2013 г. введена в строй система оперативной передачи данных. С донной станции по морскому дну протянут бронированный кабель к серверу, расположенного в кунге на конце причала. По этому кабелю с помощью

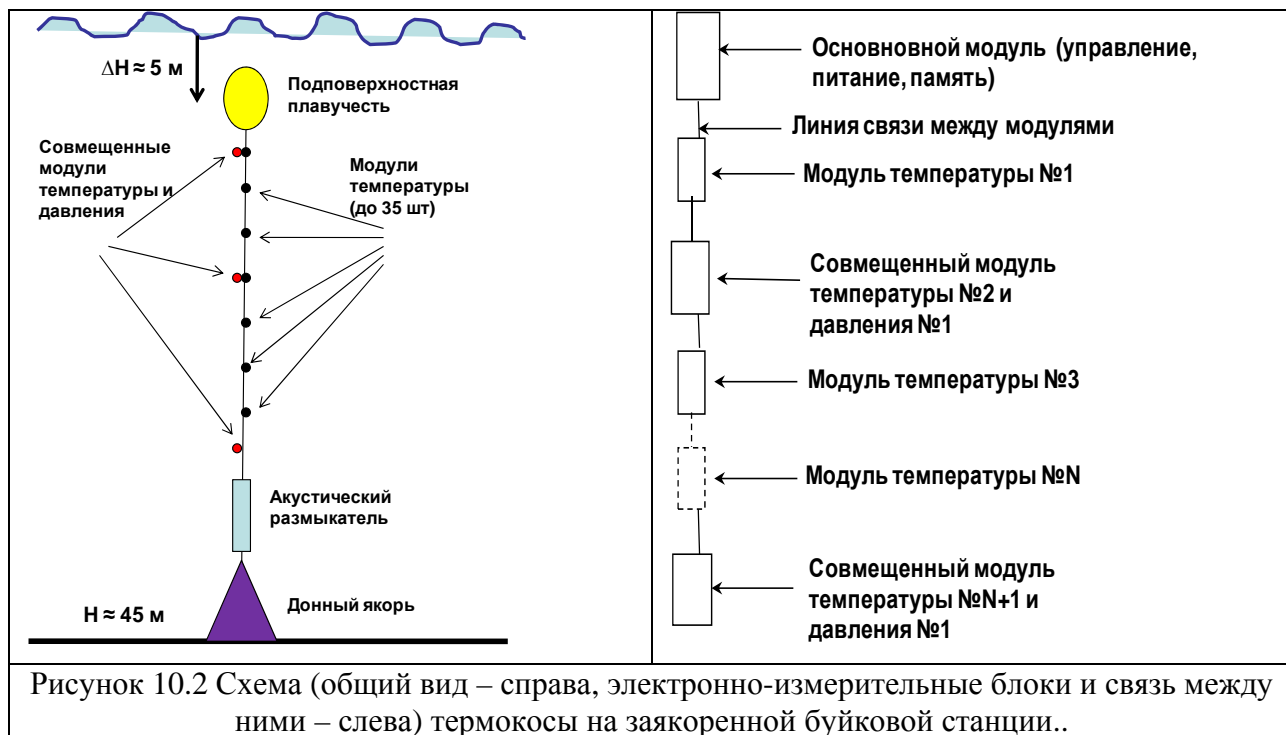
специально разработанного модема на донную ADCP и расположенную рядом с ней заякоренную термокосу подается электропитание, и передаются в береговой центр данные измерений в реальном времени.

Постановки AWAC и SonTek проводятся с целью получения квазинепрерывных рядов измерений. Сроки уточняются в рабочем порядке в зависимости от запланированных экспедиций: январь-март, апрель-июнь, июль-сентябрь, октябрь-декабрь. Постановки выполняются с кратковременными перерывами на техническое обслуживание приборных комплексов и замены источников тока. Перерывы между постановками используются для считывания данных измерений и проведения дополнительных испытаний. Как правило, перерыв длится 5-10 дней.

Акустический профилограф RDI WH 600 соединен с сервером и источником питания с помощью подводного кабеля, что обеспечивает непрерывный режим работы приборного комплекса и оперативную передачу данных измерений. Перерывы в работе связаны с выполнением профилактических работ, которые выполняются с периодичностью 1 раз в год обычно в летний период. Перерыв длится не более 5-10 дней.

#### 10.5.4 Характеристика заякоренной термокосы

Для измерений вертикального распределения температуры воды и ее временного изменения на гидрофизическом полигоне используются линии термодатчиков – термокосы (рисунок 10.2), разработанная в АО ИО РАН.



Всего на полигоне используются 3 термокосы:

- термокоса № 1 – 17 датчиков (плюс 3 датчика давления), длина – 14 м, расстояние между датчиками – 82 см, заглубление подповерхностной плавучести – 7-8 м, район постановки – траверс Голубой бухты, глубина ~22 м;

- термокоса № 2 – 15 датчиков (плюс 3 датчика давления), длина – 20 м, расстояние между датчиками – 125 см, заглубление подповерхностной плавучести – 7-8 м, район постановки – траверс Толстого мыса Геленджикской бухты, глубина ~28 м;

- термокоса № 3 – 31 датчик (плюс 3 датчика давления), длина – 60 м, расстояние между датчиками – 200 см, заглубление подповерхностной плавучести – 9-10 м, район постановки – траверс Толстого мыса Геленджикской бухты, глубина ~85 м.

Управляющий модуль термокосы позволяет получать данные измерений в ASCII-кодах, доступные для дальнейшей обработки стандартными программными комплексами (MatLab, Excel, Surfer и пр.).

Постановки термокос проводятся с целью получения квазинепрерывных рядов измерений. Сроки уточняются в рабочем порядке в зависимости от запланированных экспедиций: январь-март, апрель-июнь, июль-сентябрь, октябрь-декабрь. Постановки выполняются с кратковременными перерывами на техническое обслуживание и замены источников тока. Перерывы между постановками используются для считывания данных измерений и проведения дополнительных испытаний. Как правило, перерыв длится 10-15 дней.

#### **10.5.5 Методика проведения измерений с зонд-профилографом «Аквалог»**

Общий порядок работ зонда-профилографа «Аквалог» осуществляется в соответствии с Руководством по эксплуатации аппарата:

1) при необходимости на аппарате устанавливаются зонды сторонних изготовителей в соответствии с руководством «Использование по назначению».

2) проводится функциональный тест аппарата в соответствии с руководством «Использование по назначению».

3) осуществляется установка и подъем аппарата в соответствии с руководством «Использование по назначению».

4) скачиваются данные телеметрии в лог файл (см. руководство «Использование по назначению»).

5) скачиваются данные с зондов сторонних изготовителей в соответствии с руководством «Использование по назначению».

б) регулярно производится техническое обслуживание аппарата в соответствии с «Руководством по обслуживанию» и зондов сторонних производителей (в соответствии с руководствами по их использованию).

Снятие-постановка зонда-профилографа «Аквалог» осуществляется по следующей схеме.

1) Непосредственно перед буйковой постановкой с помощью внешнего компьютера в аппарат вводится программа по выполнению профилирования. Задаваемые значения:

- срок работы – до принудительного выключения оператором и 2000 циклов,

- профилирование между горизонтами 15 м и 270 м,

- профилирование 3 раза в сутки в 00:00, 08:00, 16:00 по Гринвичу,

- режим профилирования - в начале каждого цикла профилограф опускается с горизонта 100 м до горизонта 270 м, выстаивается 1 мин, затем поднимается до горизонта 15 м, выстаивается 1 мин, затем опускается до горизонта 100 м и выстаивается до начала следующего цикла,

- скважность измерения тока в электрической цепи двигателя аппарата 1 с.

2) Устанавливается буйковая станция с аппаратом «Аквалог» на изобате 265 м в окрестности точки с координатами 44°28,75' с.ш., 37°56,24' в.д. (см. схему гидрофизического полигона на рисунке 9.1).

3) После окончания этапа измерений, но не позднее 6 месяцев с момента постановки, при благоприятных погодных условиях выйти в точку постановки. С судна проводится зондирование контрольным СТД-зондом SBE 19plus для сравнения с данными автоматизированных измерений с помощью аппарата «Аквалог».

4) После подъема зонда-профилографа «Аквалог» на борт судна обеспечения данные измерений и телеметрии считываются во внешний программатор (компьютер).

5) Осуществляется контрольная проверка работы зонда-профилографа «Аквалог».

#### **10.5.6 Методика проведения работ с акустическими доплеровскими профилографами течений**

Общий порядок работ акустического профилографа осуществляется в соответствии с Руководством по эксплуатации прибора:

- проводится функциональный тест;

- производится настройка программы измерений;

- осуществляется установка и подъем;

- скачиваются данные измерений;

- регулярно производится техническое обслуживание прибора.

Подготовка и постановка акустического профилографа AWAC осуществляется по следующей схеме.

1) Непосредственно перед постановкой с помощью внешнего компьютера в прибор вводятся данные по программе измерений. Задаваемые значения:

- глубина места и количество горизонтов измерений,
- количество пингов, время осреднения и записи информации (определяется, в основном, объемом информации, записываемой за весь цикл измерений, который ограничен возможностью внутренней памяти прибора – 10 МБ).

2) Прибор с батарейным блоком фиксируется канатами в пластиковом коробе со свинцовыми грузами.

3) Для постановки донной станции при благоприятных погодных условиях маломерное судно обеспечения (катер “Воронеж-М” или резиновая лодка “Кайман”) выходит в заданную географическую точку (траверз Толстого мыса Геленджикской бухты, координаты 44°32.546 с.ш. 38°02.685 в.д.). Позиционирование осуществляется с помощью бортового GPS-навигатора Garmin-235.

Получение и обработка данных осуществляется на берегу с помощью внешнего компьютера, на котором установлено ПО фирмы производителя прибора. ПО прибора позволяет выводить данные измерений в ASCII-кодах, доступные для дальнейшей обработки стандартными программными комплексами (MatLab, Excel, Surfer и пр.).

### **10.5.7 Методика проведения работ с термокосой**

#### **Общий порядок работ с термокосой:**

- сборка термокосы;
- калибровка термодатчиков;
- постановка, снятие прибора, скачивание данных;
- профилактические работы.

Сборка термокосы осуществляется по следующей схеме.

1) Отмеряется необходимой длины несущий трос 6 мм, через определенные расстояния маркером отмечаются места крепления датчиков. На концах троса крепятся скобы и вертлюг.

2) На отмеченные места производится крепление пластиковыми зажимами и скотчем термодатчиков, датчиков давления, управляющего блока с питанием.

Калибровка осуществляется в следующем порядке.

1) Датчики термокосы помещаются в термозащищенный бак с водой, в котором добавлением льда поддерживается постоянная температура около (0<sup>0</sup>C) и равномерное ее



распределение перемешиванием погруженным миксером. Производится запись тестовых измерений.

2) Данные считываются. Определяется ошибка каждого температурного датчика. Разрабатывается таблица тарифовочных коэффициентов.

Постановка термокосу осуществляется в следующем порядке.

1) Для постановки донной станции при благоприятных погодных условиях судно обеспечения (БМП "Ашамба") выходит в заданную географическую точку. Позиционирование осуществляется с помощью судового GPS-навигатора. Во время перехода в точку постановки в одну линию соединяются термокоса, подповерхностная плавучесть и якорный груз термокосу, поисковый фал 12 мм длиной ~ от 100 до 200 м (в зависимости от глубины постановки) с якорным грузом.

2) Судно ложится в дрейф. Включается управляющий блок термокосу. За борт выводится последовательно подповерхностная плавучесть, термокоса. Контролируя поисковым фалом, на дно опускается якорный груз термокосу. В момент касания груза дна фиксируются координаты установки термокосу. По мере дрейфа вытравливается за борт поисковый конец, обеспечивается его натяжение и сбрасывается якорный груз. Фиксируются координаты якорного груза на конце поискового фала.

Профилактические работы включают очистку термокосу от моллюсков, иловых отложений, замену вышедших из строя датчиков, замену элементов питания.

### **10.5 Формирование состава, видов и объемов работ на подспутниковом полигоне в ходе натурных измерений с помощью автономных измерительных комплексов**

Натурные измерения с помощью автономных измерительных комплексов по проекту предполагается выполнить в два этапа: июль-декабрь 2014 г и январь-декабрь 2015 г.

*Работы на 1-м этапе включают следующие измерения:*

1) Исследования изменчивости гидрологической структуры, динамики вод участка шельфового склона Северо-Кавказского побережья Черного моря автоматизированной заякоренной станцией с зонд-профилографом «Аквалог».

Определяемые параметры:

- временной ход вертикальной распределения модуля скорости и направления течений с возможностью дальнейшего выделения северной, восточной, вдольбереговой и поперечной к берегу составляющих течения;

- временной ход вертикального распределения мощности сигнала обратного акустического рассеивания;

- временной ход вертикального распределения гидрологических параметров морской воды (температуры, солености, плотности).

2) Исследования гидродинамической изменчивости на участке шельфа Северо-Кавказского побережья Черного моря автоматизированными донными станциями в составе доплеровских измерителей течений AWAC, SonTek, ADCP WH-600.

Определяемые параметры:

- временной ход вертикальной распределения модуля скорости и направления течений с возможностью дальнейшего выделения северной, восточной, вдольбереговой и поперечной к берегу составляющих течения;

- временной ход вертикального распределения мощности сигнала обратного акустического рассеивания.

3) Исследования временной изменчивости вертикального распределения температуры морской воды на участке шельфа Северо-Кавказского побережья Черного моря автоматизированными донными станциями в составе термокос №№ 1-3.

Определяемые параметры:

- временной ход распределения температуры морской с вертикальным разрешением: 82 см; 125 см; 200 см.

4) Испытания системы передачи данных зонда-профилографа “Аквалог” на береговой пункт приема информации для обеспечения возможность оперативного приема контрольных параметров работы Аквалога (в перспективе – приема измеряемых параметров). Для организации бесконтактной связи в морской воде предполагается использовать:

- индуктивный модем компании Seabird SBE IMM с катушкой индуктивности, размещенный в прочном корпусе на подповерхностном бую;

- индуктивный модем компании Seabird SBE IMM с катушкой индуктивности, размещенный на носителе.

Для организации передачи данных от поверхностного бую к береговому пункту приема информации предполагается использовать поверхностный буй с модемом GPRS типа «Невод».

5) Апробация методики постановки и снятия донных станций в составе термокос с использованием размыкателей на якорных системах, упрощающих процедуру поиска донных станций. При размыкании якорной системы плавучесть поднимает станцию на поверхность воды. Для облегчения визуального обнаружения плавучесть рекомендуется выкрасить в ярко оранжевый цвет.

б) Аprobация методики поиска места установки донной станции (до глубин 25 м) водолазным способом с использованием сигнального фала, растянутого по дну, что позволит значительно упростить поиск донных станций в неблагоприятных гидрометеорологических условиях. Аprobацию методики предполагается выполнить на донной станции в составе акустического измерителя течений AWAC.

7) Выполнение подготовительных работ для реализации в дальнейшем методики передачи данных в режиме реального времени по оптоволоконному кабель-каналу. Оптоволоконный кабель по сравнению с коаксиальным обладает значительно большей информационной пропускной способностью примерно в 100-200 раз. Использование оптоволоконного кабеля позволит подключить к линии большее количество приборных комплексов с большим до 100 Мб/с информационным потоком (в настоящий момент подключено два – термокоса и ADCP информационный поток 200 кб/с).

*Работы на 2-м этапе включают следующие измерения:*

1) Исследования изменчивости гидрологической структуры, динамики вод участка шельфового склона Северо-Кавказского побережья Черного моря автоматизированной заякоренной станцией зонд-профилограф «Аквалог».

Определяемые параметры:

- временной ход вертикального распределения модуля скорости и направления течений с возможностью дальнейшего выделения северной, восточной, вдольбереговой и поперечной к берегу составляющих течения;

- временной ход вертикального распределения мощности сигнала обратного акустического рассеивания;

- временной ход вертикального распределения гидрологических параметров морской воды (температуры, солености, плотности).

2) Исследования гидродинамической изменчивости на участке шельфа Северо-Кавказского побережья Черного моря автоматизированными донными станциями в составе доплеровских измерителей течений AWAC, SonTek, ADCP WH-600.

Определяемые параметры:

- временной ход вертикального распределения модуля скорости и направления течений с возможностью дальнейшего выделения северной, восточной, вдольбереговой и поперечной к берегу составляющих течения;

- временной ход вертикального распределения мощности сигнала обратного акустического рассеивания.

3) Исследования временной изменчивости вертикального распределения температуры морской воды на участке шельфа Северо-Кавказского побережья Черного моря автоматизированными донными станциями в составе термокос.

Определяемые параметры:

- временной ход распределения температуры морской с вертикальным разрешением: 82 см; 125 см; 200 см.

4) Тестовая передача данных зонда-профилографа «Аквалог» на береговой пункт приема информации по линии бесконтактной связи с помощью индуктивного модема компании Seabird SBE IMM с катушкой индуктивности, размещенного в прочном корпусе на подповерхностном буре, и индуктивного модема компании Seabird SBE IMM с катушкой индуктивности, размещенного на носителе.

5) Реализация методики постановки и снятия донных станций в составе термокос с использованием размыкателей на якорных системах. Методики реализовать на донных станциях в составе термокос №№ 1 и 3.

6) Реализация методики поиска места установки донной станции (до глубин 25 м) водолазным способом с использованием сигнального фала, растянутого по дну. Реализацию методики предполагается выполнить на донной станции в составе акустического измерителя течений AWAC.

7) Реализация методики передачи данных в режиме реального времени по оптоволоконному кабель-каналу. Реализацию методики предполагается выполнить на донной станции в составе акустического измерителя течений ADCP WH-600, термокосы №2.

## 11 ПРОВЕДЕНИЕ НАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ АВТОНОМНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ НА ПОДСПУТНИКОВОМ ПОЛИГОНЕ В ШЕЛЬФОВО-СКЛОНОВОЙ ЗОНЕ ЧЕРНОГО МОРЯ

### 11.1 Общие сведения о натуральных измерениях, выполненных с помощью гидрофизических автономных станций

Схема подспутникового полигона с указанием точек постановок автономных заякоренных и донных станций изображена на рисунке 11.1. Данный полигон permanently функционирует с июня 2013 г. за исключением кратковременных перерывов, требуемых для профилактики измерительных систем, замены блоков батарейного питания и скачивания полученных данных.

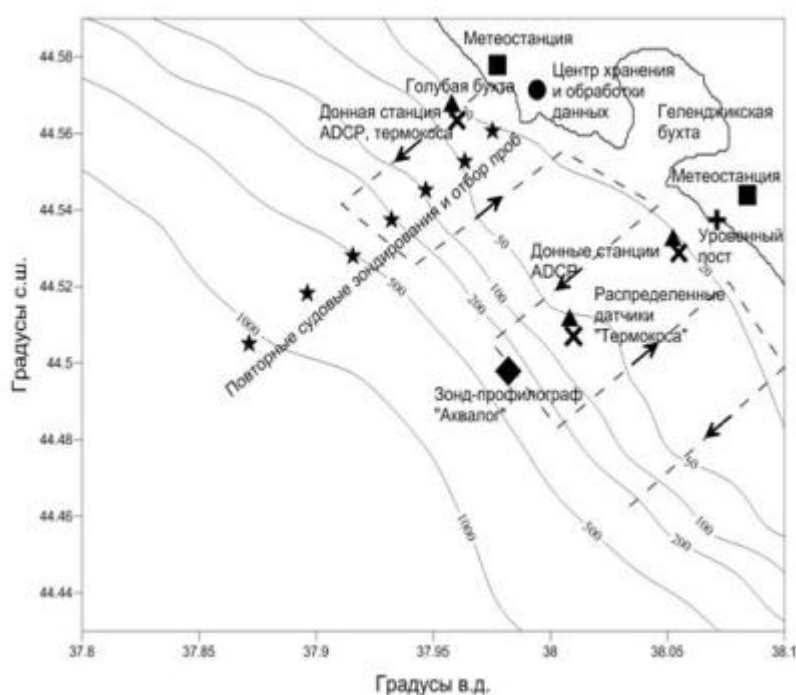


Рисунок 11.1 – Схема постоянно действующего гидрофизического полигона: квадрат – метеостанции; треугольник – донные станции ADCP; крест – термоксы; ромб – зонд-профилограф «Аквалог». Звездочками обозначены станции судовых мониторинговых наблюдений, включающих STD – зондирования. Пунктирной линией со стрелками обозначены галсы судна при проведении измерений поля скорости течения с помощью буксируемого за судном ADCP

Сведения о постановке и перестановках автономных измерительных станций на подспутниковом полигоне в отчетный период приведены в таблице 11.1.

Таблица 11.1 – Сведения о постановке и перестановках автономных измерительных станций на подспутниковом полигоне в период июнь-декабрь 2014 г.

№ пп	Описание измерительной системы	Даты (установки-снятия системы)	Место установки, координаты	Глубина места, м
1	«Аквалог» -250 м. Зонд-профилограф «Аквалог» на заякоренной буйковой станции с измерительным оборудованием: СТД-зонд Idronaut 316, акустический измеритель скорости течения Aquadorr 2 мГц	03.07-22.09	Траверс Толстого мыса Геленджикской бухты 44°29, 416' с.ш., 37°58, 379' в.д	~270
		06.10- по настоящее время (ориентировочно до середины декабря)	44°29,398' с.ш., 37°58,086' в.д	
2	AWAC – 25 м. Донная станция с акустическим профилографом течений ADCP AWAC 1000 кГц с функцией измерения поверхностного волнения.	25.06-22.09  10.10-по настоящее время (ориентировочно до середины декабря)	Траверс Толстого мыса Геленджикской бухты 44°32.546 с.ш. 38°02.685 в.д.	25
3	Станция 22 м. Питание станции береговое по подводному кабелю (выведен в кунг на конце причала), по которому также осуществляется передача информации в режиме реального времени. В составе станции: 1. Акустический профилограф течений ADCP RDI WH 600 с функцией измерения поверхностного волнения. 2. Термокоса № 1 (17 датчиков, длина – 14 м, расстояние между датчиками – 82 см, заглубление подповерхностной плавучести (сигары) – 7-8 м)	Установлена 02.07, работает в режиме непрерывной передачи и записи данных эксперимента	Траверс Голубой бухты Координаты ADCP: 44° 34, 190' с.ш., 37° 58, 444' в.д.  Координаты термокосы: 44°34.190' с.ш., 37°58.424' в.д.	22
4	Термокоса № 2 Заякоренная буйковая станция, представляющая собой вертикально расположенную линию термодатчиков с блоком питания и управления (18 датчиков, длина – 18 м, расстояние между датчиками – 100 см,	02.07-22.09	Створ Толстого мыса Геленджикской бухты  44°32.240 с.ш.; 38°02.500 в.д.	28.8
		06.10-по наст. время (ориентировочно до середины декабря)	44° 32.324 с.ш., 38° 02.380 в.д	

№ пп	Описание измерительной системы	Даты (установки-снятия системы)	Место установки, координаты	Глубина места, м
	заглубление подповерхностной плавучести (сигары) – 9-10 м.) Термокоса № 2			
5	Станция 85 м В составе станции: 1. Термокоса № 3. Заякоренная буйковая станция, представляющая собой вертикально расположенную линию термодатчиков с блоком питания и управления (31 датчик, длина – 60 м, расстояние между датчиками – 200 см, заглубление подповерхностной плавучести (сигары) – 9-10 м). 2. ADP Sontek 250. Донный акустический профилограф течений.	02.07-22.09	Створ Толстого мыса Геленджикской бухты Координаты термокосы № 3: 44°29.581' с.ш., 37°59.426' в.д.  Координаты ADP: 44°29.656 с.ш.; 37°59.495 в.д.	85
		06.10-по наст. время (ориентировочно до середины декабря)	Координаты термокосы № 3: 44°29.878' с.ш., 37°59.136' в.д. Координаты ADP: 44°29.844 с.ш.; 37°59.256 в.д.	

Практические измерения проводились на протяжении двух периодов времени, наглядно представленных на рисунке 11.2.

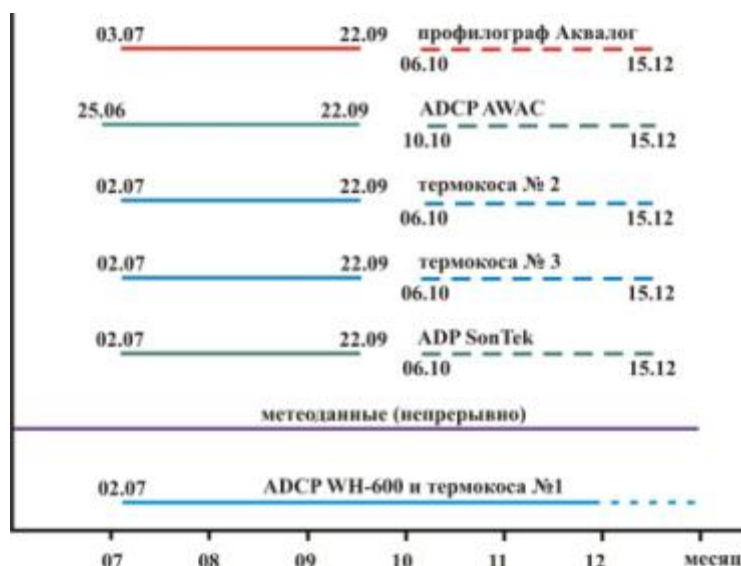


Рисунок 11.2 – Метаданные гидрофизического полигона за отчетный период июнь-декабрь 2014 г. Цифрами обозначены даты начала и конца непрерывных наблюдений. Сплошная линия – полученные данные. Пунктирная линия – данные, которые предполагается получить после снятия приборных комплексов

## 11.2 Сбор, обработка и представление метеорологических данных

Технологии комплексного экологического мониторинга прибрежной зоны моря, проводимый на развернутом гидрофизическом полигоне Северо-Кавказского побережья Черного моря, предполагает сбор, обработку и совместный анализ метеорологических данных.

Для анализа используются данные ГМС Геленджика, расположенной на Толстом мысу Геленджикской бухты (координаты станции – 44.55° с.ш., 38.05° в.д.). В стандартные метеорологические сроки (через 3 часа – 00, 03, 06, 09, 12, 15, 18 и 21 час по Гринвичу) на станции регистрируются следующие параметры:

- скорость и направление ветра;
- максимальная скорость ветра – максимальный порыв ветра между сроками наблюдений за 3 часа;
- приземное атмосферное давление;
- температура воздуха;
- влажность воздуха.

Осадки представляются на 0 часов (по Гринвичу) каждых суток, уровень моря – по срокам через 6 часов. Соленость воды определяется 1 раз в сутки в 15 часов по Гринвичу.

Метеорологические данные, записанные в журнал наблюдений, переводятся в компьютерный вид, доступный для обработки стандартными программными комплексами (MatLab, Excel, Surfer и пр.). Для первичного анализа полученные данные представляются в виде диаграмм и графиков хода отдельных параметров в разных диапазонах временной изменчивости. Пример графического представления результатов метеорологических наблюдений представлен на рисунке 11.3. Одновременно проводится обобщающий анализ данных, даются статистические оценки изменчивости метеопараметров (таблица 11.2), и выполняется сравнение полученных результатов со среднемноголетними наблюдениями.



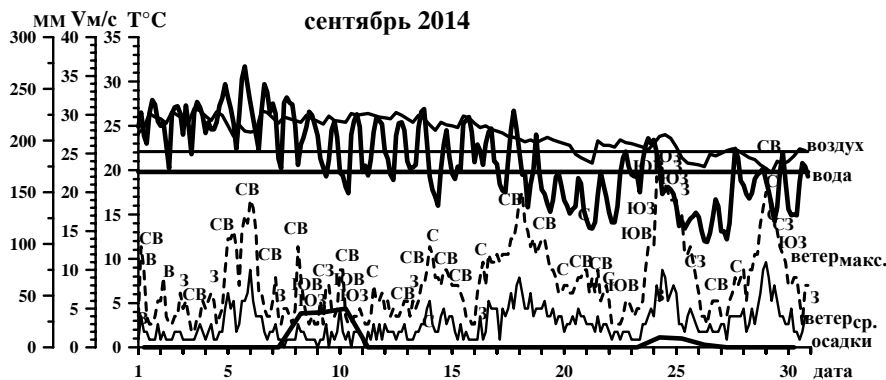
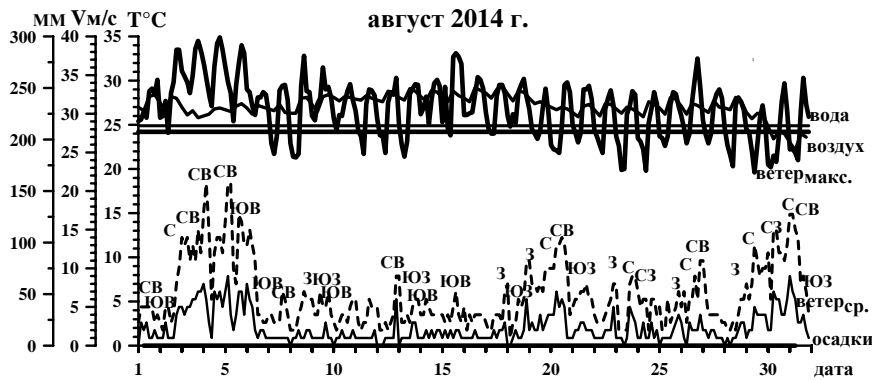
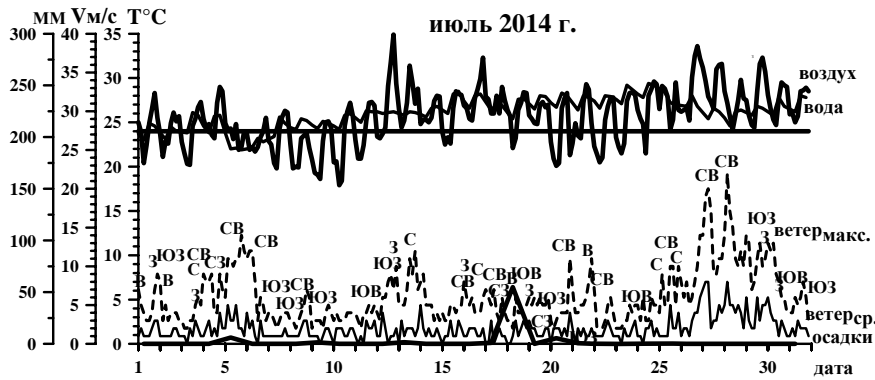
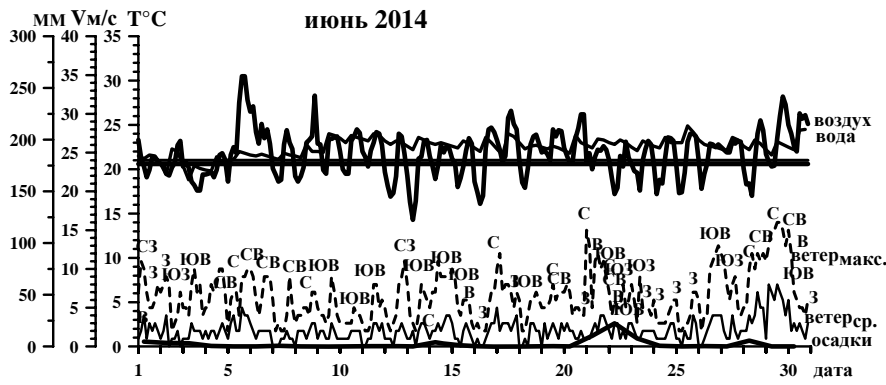


Рисунок 11.3 – Графическое представление результатов метеорологических наблюдений по месяцам. Данные ГМС г. Геленджика.

В верхней части графиков – временной ход температуры воды и воздуха.  
В нижней – скорость и направления ветра (в румбах), средняя и в порывах;  
осадки

Таблица 11.2 – Характеристики повторяемости ветров основных румбов по месяцам за период 2014 г. (%) и максимальные скорости ветра

2014 г.													
мес.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	год
С	14.5	<b><u>23.7</u></b>	15.7	15.4	10.1	10.8	<b><u>20.6</u></b>	21.4	19.6				
СВ	28.2	<b>21.4</b>	<b>18.1</b>	20.0	16.1	<b>18.3</b>	<b>16.5</b>	<b><u>23.0</u></b>	<b><u>39.2</u></b>				
В	14.5	<b>22.3</b>	<b>18.5</b>	14.2	<b><u>25.8</u></b>	13.8	11.3	6.9	8.3				
ЮВ	15.7	15.6	<b><u>22.2</u></b>	<b><u>26.7</u></b>	<b>24.6</b>	<b><u>21.3</u></b>	12.9	11.7	7.9				
Ю	0.0	1.3	2.4	5.4	8.9	3.8	4.4	5.6	0.8				
ЮЗ	8.1	7.1	10.1	8.3	7.7	<b>18.3</b>	<b>18.1</b>	<b>16.1</b>	9.6				
З	8.5	3.1	6.9	7.9	6.0	10.0	8.9	10.5	12.1				
СЗ	10.5	5.4	6.0	2.1	0.8	3.8	7.3	4.8	2.5				
Σс- Σю	29.4	26.3	5.2	-2.9	<b><u>-14.1</u></b>	-10.4	8.9	15.7	<b><u>42.9</u></b>				
Боле е 12 м/с	<b>8.1</b>	6.25	<b><u>16.9</u></b>	5.8	3.2	4.6	<b><u>2.8</u></b>	12.5	<b>19.6</b>				
V макс.	<b>17</b>	19	<b><u>31</u></b>	16	17	16	<b>13</b>	21	22 юв				

Примечание. Жирным шрифтом выделены преобладающие направления ветра и экстремальные характеристики разности суммарных северных и южных ветров, повторяемости ветров более 12 м/с и максимальных скоростей ветра. Максимальные характеристики подчеркнуты чертой.

### 11.3 Результаты натурных измерений с помощью автономных измерительных комплексов на подспутниковом полигоне

Проанализированы данные об изменчивости вертикального распределения гидрофизических характеристик (температура, соленость, плотность воды и скорость течения) в верхнем 200-метровом слое Черного моря над континентальным склоном, полученные благодаря использованию автономного профилографа «Аквалог» на заякоренной буйковой станции. Установлено наличие интенсивных колебаний положения перманентного пикно-халоклина и верхней границы сероводородной зоны (изопикническая поверхность 16.2 у.е.) с характерным периодом 5-15 суток, обусловленных меандрированием Основного черноморского течения. Эти колебания вызывают короткопериодные изменения толщины кислородосодержащего слоя на 20-50 м, что составляет до одной трети его общей толщины (рис. 11.4, 11.5). При этом при проходе циклонического меандра через точку постановки зонда-профилографа «Аквалог»

наблюдается опускание изопикн в пикно-халоклине и связанной с ними верхней границы сероводородной зоны, а при проходе антициклонического меандра – изопикнические поверхности и сероводородная граница поднимаются.

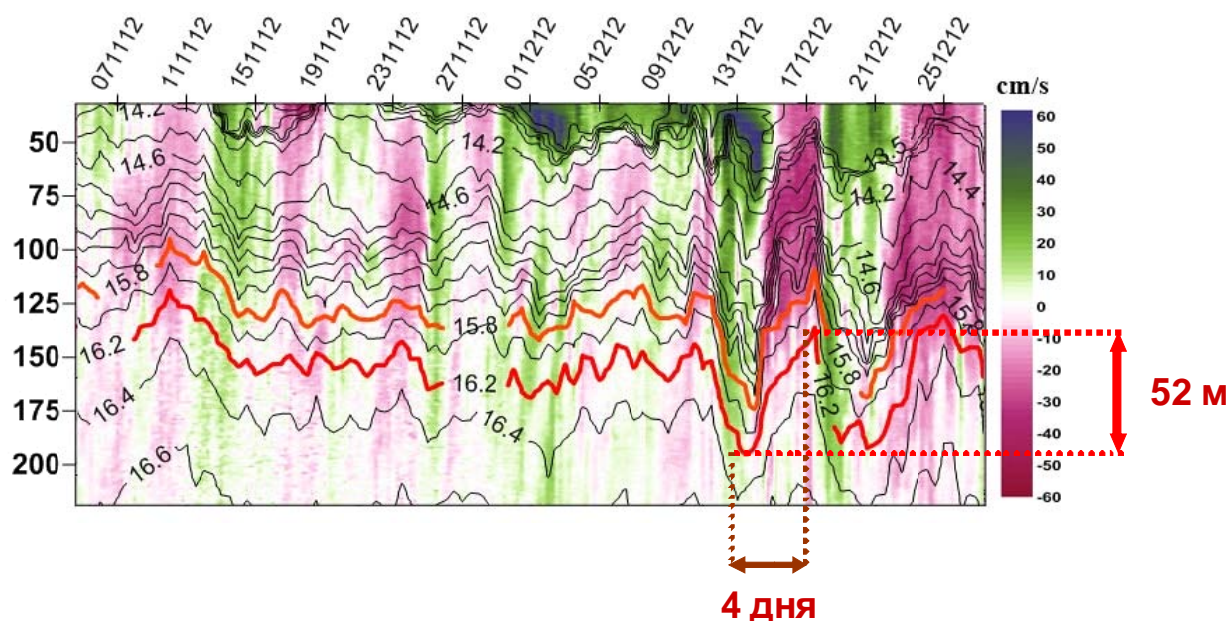


Рисунок 11.4 – Связь короткопериодных (5-15 суток) вертикальных колебаний изолиний плотности (черные кривые) с вдольбереговой скоростью течения. Данные профилографа «Аквалог» в Черном море в период 5 ноября – 27 декабря 2012 г. Глубина места – 265 м, частота зондирования – 4 раза в сутки. Оранжевая кривая – нижняя граница кислородной зоны (условная плотность -15.8), красная кривая – верхняя граница сероводородной зоны (условная плотность - 16.2)

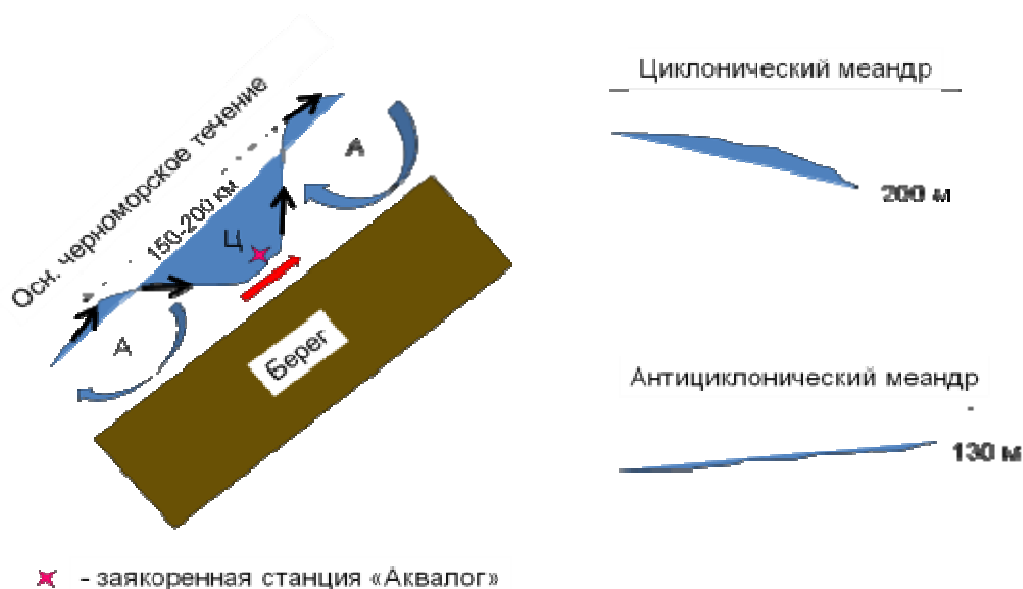


Рисунок 11.5 – Схема формирования 5-15 суточных вертикальных колебаний изопикн (верхней границы сероводородной зона) из-за меандрирования ОЧТ и прохождения циклонических и антициклонических меандров через точку постановки станции зонда-профилографа «Аквалог»

Спектральный анализ годичного ряда данных скорости течения, измеренной с помощью автономного зонда-профилографа «Аквалог» показал, что на масштабах времени более одних суток, но менее одного года, в верхнем 50-м слое имеется три характерных максимума энергии, соответствующим временным масштабам субмезомасштабных шельфовых вихрей (4-5 суток), мезомасштабных вихрей и меандрирования Основного черноморского течения (7-9 суток), внутрисезонной перемежаемости ветровой накачки бассейновой циркуляции вод (30-60 суток) (рис. 11.6).

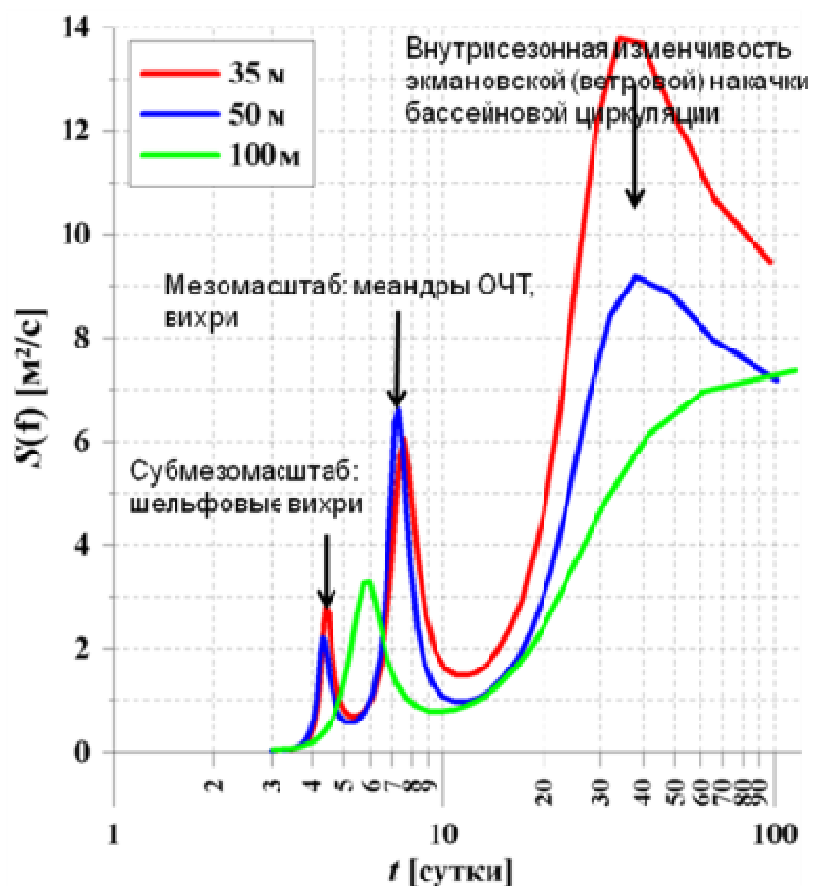


Рисунок 11.6 – Спектры колебаний энергии течений в верхней части континентального склона (265 м) на трех горизонтах (35, 50 и 100 м) по данным зонда «Аквалог» (годичный ряд)

Начаты исследования физических закономерностей прибрежных апвеллингов и даунвеллингов, оказывающих существенное влияние на биопродуктивность прибрежной зоны моря на основе анализа данных измерений заякоренной термоксы и донной станции акустического профилографа скорости течения расположенных на глубине 22 м на траверзе

Голубой бухты. Установлено, что достаточно редкие события полного апвеллинга, заключающегося в подъеме холодных и богатых биогенами подтермоклинных вод к морской поверхности, как правило обусловлены ветровым воздействием. Часто повторяющиеся события неполного апвеллинга и даунвеллинга, заключающиеся в изменении положения сезонного термоклина (его подъеме - опускании при сохранении квазидвуслойной стратификации), главным образом, вызваны флуктуациями интенсивности и направления вдольберегового течения не имеющими связи с локальным ветровым воздействием (рис. 11.7).

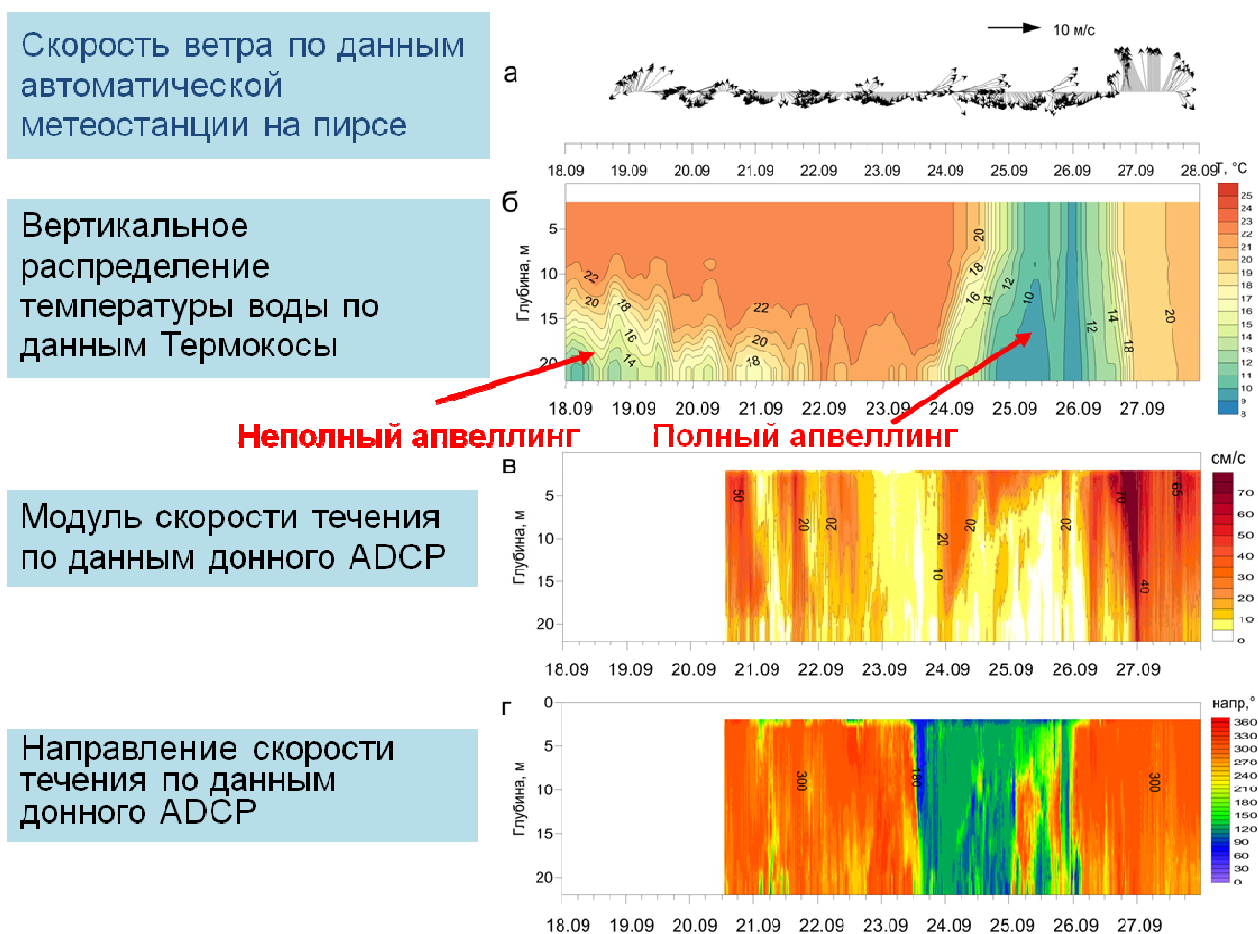


Рисунок 11.7 – Пример регистрации событий полного и неполного апвеллинга с помощью автономных станций заякоренной термокосы и донного ADCP установленных на глубине 22 м на траверзе Голубой бухты

Выполнен совместный анализ данных регистрации сигнала обратного акустического рассеивания акустического измерителя Aquadopp, расположенного на зонде-профилографе «Аквалог» и послойных сетных ловов зоопланктона (рис. 11.8). Этот анализ выявил наличие сезонных изменений характера вертикального распределения и миграции зоопланктона. Наименьшая амплитуда суточных вертикальных миграций наблюдалась

зимой и ранней весной, а летом и осенью она увеличивалась. Это связано с более равномерным вертикальным распределением фитопланктона, основного корма зоопланктона, в зимне-весенний период по сравнению с летне-осенним сезоном, когда распределение фитопланктона характеризуется ярко-выраженным узким максимумом фитопланктона, приуроченным к сезонному термоклину.

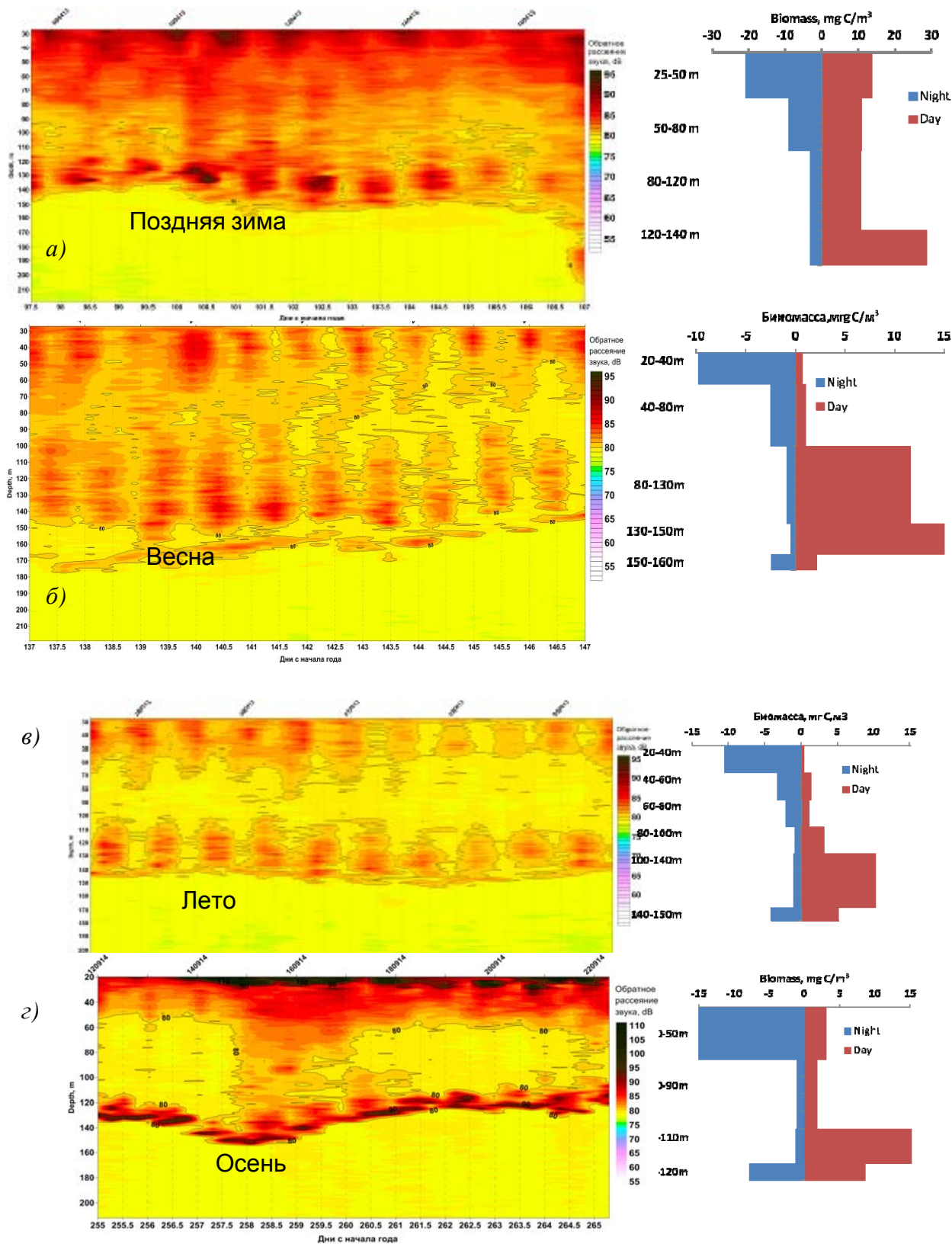


Рисунок 11.8 – Вертикальные распределения сигнала обратного акустического рассеяния в дВ по данным «Аквалога» (слева) и биомасса зоопланктона в мгС/м<sup>3</sup> по данным сетных ловов в разные сезоны года

Результаты зондирования «Аквалога» и послойные сетные ловы планктона показали, что диапаузирующий слой фонда копепод *Calanus euxinus* формируется весной и permanently существует в течение лета и осени в нижней части кислородной зоны, выживая при концентрации кислорода 3-5  $\mu\text{M}$ .

**Выводы.** Натурные измерения с помощью автономных измерительных комплексов на подспутниковом полигоне в шельфово-склоновой зоне Черного моря проведены в 2014 г. в полном соответствии с Программой и методикой исследований. На подспутниковом полигоне выполнена установка пяти измерительных комплексов и осуществлена настройка их автономной работы. В течение отчетного периода осуществлена непрерывная запись гидрофизических данных во внутреннюю память приборов. Часть полученных данных прошла первичную обработку и анализ, сформированы массивы данных о гидродинамической структуре вод в летний и осенний сезоны 2014 г. на подспутниковом полигоне. Проведено успешное испытание системы передачи данных зонда-профилографа «Аквалог» на береговой пункт приема информации для обеспечения возможности оперативного приема контрольных параметров работы «Аквалога». Выполнена апробация эффективных методик поиска, постановки и снятия донных станций.

## 12 УЧАСТИЕ В МЕРОПРИЯТИЯХ, НАПРАВЛЕННЫХ НА ОСВЕЩЕНИЕ И ПОПУЛЯРИЗАЦИЮ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ПНИ

Исполнители проекта принимали участие в следующих мероприятиях, направленных на освещение и популяризацию промежуточных результатов ПНИ.

1) Международная конференция «Современное состояние и перспективы наращивания морского ресурсного потенциала Юга России» (15-18 сентября 2014 г., пгт. Кацивели, Республика Крым). Представлен научный доклад:

*Зацепин А.Г., Дивинский Б.В., Куклев С.Б., Пиотух В.Б., Подымов О.И., Островский А.Г., Сильвестрова К.П., Кубряков А.А., Соловьев Д.М., Станичный С.В.* «Некоторые результаты исследований изменчивости параметров морской среды в шельфово-склоновой зоне Черного моря на подспутниковом полигоне ИО РАН» // Международная научная конференция «Современное состояние и перспективы наращивания морского ресурсного потенциала юга России». - пгт. Кацивели, 15-18 сентября 2014 г. – Тезисы докладов. - Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014.- С.129. <http://www.mhi.nas.gov.ua/files/theses.pdf>

2) 12-й Всероссийская конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, ИКИ РАН, 10-14 ноября 2014) Представлены научные доклады:

*Зацепин А.Г. Дивинский Б.В., Куклев С.Б., Мельников В.А., Пиотух В.Б., Подымов О.И., Островский А.Г., Сильвестрова К.П., Кубряков А.А., Соловьев Д.М., Станичный С.В., Мысленков С.А.* Исследования изменчивости параметров морской среды и формирующих ее физических процессов на подспутниковом полигоне ИО РАН в Черном море // // 12-я Всероссийская открытая конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". – Москва, ИКИ РАН, 10-14 ноября 2014 г., С. 248. [http://smiswww.iki.rssi.ru/d33\\_conf/thesisshow.aspx?page=91&thesis=4496](http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=91&thesis=4496).

*Мельников В.А., Пиотух В.Б., Москаленко Л.В., Кузеванова Н.И.* Ветер, течения и энергетический обмен в гидрометеорологической системе на шельфе в северо-восточной части Черного моря // 12-я Всероссийская открытая конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". – Москва, ИКИ РАН, 10-14 ноября 2014 г., С. 267. [http://smiswww.iki.rssi.ru/d33\\_conf/thesisshow.aspx?page=91&thesis=4669](http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=91&thesis=4669).

*Пиотух В.Б. Зацепин А.Г., Мельников В.А., Куклев С.Б., Подымов О.И., Сильвестрова К.П., Баранов В.И., Соловьев Д.М.* Инструментальные наблюдения апвеллинга и даунвеллинга на черноморском подспутниковом полигоне ИО РАН // 12-я Всероссийская открытая конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". – Москва, ИКИ РАН, 10-14 ноября 2014 г., С. 271. [http://smiswww.iki.rssi.ru/d33\\_conf/thesisshow.aspx?page=91&thesis=4680](http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=91&thesis=4680).



*Кубряков А.А., Станичный С.В., Зацепин А.Г.* Изменчивость концентрации хлорофилла А в Черном море под влиянием различных физических факторов // 12-я Всероссийская открытая конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". – Москва, ИКИ РАН, 10-14 ноября 2014 г., С. 256.  
[http://smiswww.iki.rssi.ru/d33\\_conf/thesisshow.aspx?page=91&thesis=4316](http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=91&thesis=4316).

3) Международная конференция CIESM «Научные достижения и проблемы в изучении Средиземного и Черного морей» (Сочи, 01-03 декабря, 2014 г.). Представлены пять докладов:

*Zatsepin A.G.* Coastal zone ecological monitoring at a selected polygons: example from the Black Sea.

*Ostrovskii A.G.* Hydrophysical and biological variability over the northeastern Black Sea continental slope as inferred from multiparametric tethered profiler surveys

*Kubryakov A.A., Stanichny S.V., Zatsepin A.G.* Basinscale and mesoscale currents in the Black Sea computed from satellite altimetry

*Stanichny S.V., Burduyugov V.M., Davydova E.P., Kalinin E.I., Kubryakov A.A., Soloviev D.M., Stanichnaya R.R.* Usage of remote sensing data for marine ecosystem study.

*Gusev A., V. Zalesny, V. Agoshkov, S. Moshonkin* Numerical model of the hydrodynamics of the Black Sea and the Sea of Azov with variational assimilation of temperature and salinity

4) 2-й Международный научный симпозиум PERSEUS (Марокко, Маракеш, 01-04 декабря) проекта PERSEUS Европейского Союза. Представлено два доклада:

*Podymov O.I., Arashkevich E.G., Divinsky B.V., Kuklev S.B., Ostrovskii A.G., Soloviev V.A., Zatsepin A.G.* Long-term studies of horizontal currents, acoustic backscatter and vertical thermohaline structure with moored mobile automatic profiler "Aqualog" in the north-eastern Black Sea.

*Kostyleva A.V., Kuprikova N.L., Mosharov S.A., Yakushev E.V.* Seasonal variability of dissolved organic carbon, chlorophyll *a* and major hydrochemical parameters in the north-eastern part of the Black Sea.

5) Общее собрание Отделения наук о Земле РАН (Москва, ИО РАН, 15 декабря 2014). Представлен доклад:

*Зацепин А.Г.* Механизмы и масштабы изменчивости состояния прибрежной экосистемы Черного моря: результаты исследований на геленджикском полигоне ИОРАН

6) Публикация статьи журналиста Н.Быковой «Ладно на море иль худо», освещающей работу по проекту, в электронном издании «НАУКА И ТЕХНОЛОГИИ РОССИИ – STRF.ru», по материалам интервью с руководителем проекта д.ф.-м.н. А.Г. Зацепиным.

Адрес публикации в сети Интернет:  
[http://www.strf.ru/material.aspx?CatalogId=221&d\\_no=92426&rated=ok#.VJEtz3t0rct.](http://www.strf.ru/material.aspx?CatalogId=221&d_no=92426&rated=ok#.VJEtz3t0rct)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнен аналитический обзор современной научно-технической, нормативной, методической литературы, затрагивающей научно-техническую проблему, исследуемую в рамках ПНИ в объеме 76 источников. Рассмотрены основные требования и технические условия к организации подспутниковых полигонов разного типа и принципы проведения подспутниковых измерений для калибровки спутниковых средств наблюдений и измерений и для верификации спутниковых данных. Рассмотрены современные направления численного моделирования циркуляции водных масс в морях, основанные на физически полных нелинейных системах уравнений, которые способны адекватно, не только качественно, но и количественно, воспроизводить реальные процессы, уточняя начальное состояние гидрофизических полей посредством ассимиляции данных натуральных наблюдений (в том числе контактных и спутниковых).

Проведенные патентные исследования показали, что зарегистрированные системы оценки состояния и прогноза изменений морских экосистем крайне малочисленны и включают в себя ограниченный набор параметров. Комплексная оценка по гидрофизическим, гидрохимическим и гидробиологическим параметрам, определяемым методами контактных и дистанционных измерений, не входит в состав этих систем.

Обоснован выбор направления исследований, заключающегося в научно-методическом обеспечении совокупного использования методов натуральных наблюдений (судовых и автономных), спутникового зондирования и численного моделирования с высоким пространственно-временным разрешением для разработки и развития технологии мониторинга и прогнозирования экологического состояния водной среды морского шельфа.

Разработан регионально адаптированный алгоритм восстановления концентрации хлорофилла «а» в морской воде по спутниковым данным яркости восходящего излучения. Уравнение пересчета дает ошибку  $0.083 \text{ мг/м}^3$  при коэффициенте корреляции 0.96.

Разработана методика двухканального восстановления температуры морской поверхности Черного моря по данным спутникового сканера TIRS, позволяющая получать изображения распределения температуры поверхности моря с разрешением до 100м, что

обеспечивает исследование мелких субмезомасштабных океанологических процессов – вихрей, апвеллингов и др.

Разработана численная модель с улучшенным разрешением у побережья Геленджика в районе полигона ИОРАН. Алгоритм решения прямой и сопряженной задачи основан на методе многокомпонентного расщепления. Модель включает процедуру оценки загрязнения выделенной акватории, основанную на расчете сопряженной задачи переноса пассивной примеси.

Разработаны Программы и методики натурных комплексных исследований экологических параметров и натурных измерений с помощью автономных измерительных комплексов в шельфово-склоновой зоне Черного моря в районе подспутникового полигона. Концептуальной основой Программ является комплексный мультидисциплинарный подход, включающий в себя проведение одновременных исследований объектов и процессов различной природы (физической, химической, биологической, географической), в том числе и антропогенные воздействия, и применения современных средств океанологических исследований. Основной целью Программы установлено проведение исследований ведущих параметров морской среды в шельфово-склоновой зоне Черного моря в районе существующего подспутникового полигона ИО РАН в районе г. Геленджик с целью получения необходимых данных для разработки и верификации регионально адаптированных алгоритмов и методик использования результатов спутниковых наблюдений.

Проведены натурные комплексные исследования экологических параметров и натурные измерения с помощью автономных измерительных комплексов на подспутниковом полигоне в северо-восточной части Черного моря в соответствии с программой и методикой исследований.

Результаты 1-го этапа ПНИ могут быть использованы для разработки и научно-методического обоснования программ комплексного исследования состояния и изменчивости морских прибрежных экосистем с использованием современных океанологических методов.

Экономическая эффективность внедрения результатов НИР может быть достаточно высокой. К числу наиболее значимых преимуществ и выгод следует отнести достоверные оценки ущерба от хозяйственной деятельности и определение необходимых мер и объемов компенсации, принятие эффективных технологических и организационных мер по минимизации ущерба.

Научно-технический уровень выполненных работ 1-го этапа НИР является высоким, т.к. проведены широкомасштабные (по исследованным компонентам и процесса морских

экосистем) комплексные экспериментальные исследования с применением современных высокоэффективных методов и приборной базы океанологических исследований.

Задачи 1-го этапа решены полностью, в соответствии с Техническим заданием и Планом-графиком Соглашения о предоставлении субсидии.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Черкашин А.К., Горобец Н.Н., Смирнов С.И., Атрошенко Л.М., Попов М.А., Лялько В.И., Сафронова Л.П., Костяшкин С.И. Принципы организации и обслуживания международной системы подспутниковых полигонов // Материалы четвертого белорусского космического конгресса, 27 - 29 октября 2009, Минск. Т.2. с. 12 -19.
- 2 Атрошенко Л.М., Беляев Б.И., Горобец Н.Н., Катковский Л.В. Состав реперов и калибровочных средств оптического и радиодиапазонов подспутниковых полигонов // Материалы четвертого белорусского космического конгресса, 27 - 29 октября 2009, Минск. Т.2. с. 20 -24.
- 3 Беляев Ю.В., Крот Ю.А., Катковский Л.В., Роговец А.В., Хвалец С.В. Организация и использование белорусского подспутникового полигона для полетных калибровок оптических систем космических аппаратов // Космічна наука і технологія. 2011. Том 17, № 1. С. 65-69.
- 4 Атрошенко Л.М., Горобец Н.Н., Костяшкин С.И., Сафронова Л.П. Подспутниковые полигоны Украины // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Сб. науч. ст. - М.: Ин-т космич. исслед. РАН, 2008. вып. 5, Том II. С. 265-271.
- 5 ДСТУ 4758:2007. Дистанционное зондирование. Обработка данных. Термины и определения понятий.
- 6 Проект Государственного стандарта республики Беларусь. Дистанционное зондирование. Обработка данных. Термины и определения (СТБ/ПР\_1).
- 7 Белокопытов В.Н., Багаев А.В. Статистический анализ термохалинных полей Черного моря по данным буев-профилемеров ARGO // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. - Севастополь, 2012. Вып. 26, том 2. С. 128-142.
- 8 Михайлов Н.П. История создания и развития Черноморской гидрофизической станции. Ч.1, Севастополь, 2010, 122 с. <http://ocean.phys.msu.ru/articles/2010/chomgi.pdf>
- 9 Пыркин Ю.Г. 80 лет Черноморской гидрофизической станции. // «Советский физик», Физический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова. 2009, N 4 (73), [http://www.phys.msu.ru/rus/about/sovphys/ISSUES-2009/04\(73\)-2009/8652/](http://www.phys.msu.ru/rus/about/sovphys/ISSUES-2009/04(73)-2009/8652/)
- 10 Сизов А.А., Кузнецов А.С., Полонский А.Б., Спичак Н.И. История создания и функционирования стационарной океанографической платформы в Кацивели (к 30-летию юбилею) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь, 2010. Вып. 21. С. 69-73.

- 11 Развитие морских наук и технологий в Морском гидрофизическом институте за 75 лет / Под общ. ред. В.Н.Еремеева. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2004. 702 с.
- 12 Иванов В.А., Терехин Ю.В., Пустовойтенко В.В., Кузнецов А.С. Концептуальные основы построения морского подспутникового полигона. // Мониторинг прибрежной зоны на Черноморском экспериментальном подспутниковом полигоне. Севастополь, ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014 г. С. 7-28.
- 13 К 30-летию океанографической платформы в Качивели // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь, 2010. Вып. 21 - 264 с.
- 14 Мониторинг прибрежной зоны на Черноморском экспериментальном подспутниковом полигоне. Севастополь, ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014 г. 526 с.
- 15 Chassignet, E.P., and J. Verron, eds. 2006. Ocean Weather Forecasting: An Integrated View of Oceanography. Springer, 577 pp.
- 16 Zalesny V.B., Gusev A.V., Mathematical model of the World ocean dynamics with algorithms of variational assimilation of temperature and salinity fields. Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling. 2009. V. 24, No 2, 171-190.
- 17 Zalesny V.B., N.B. Zakharova, A.V. Gusev. Four-dimensional problem of variational initialization of hydrophysical fields of the World Ocean. Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. 2011. V. 26, N. 2, P. 209-229.
- 18 Agoshkov V.I., Zalesny V.B. Variational data assimilation technique in mathematical modeling of ocean dynamics. Pure and Applied Geophysics. V. 169, N 3, 555-578, 2012.
- 19 Hecht, M., and H. Hasumi (Eds.), Ocean Modeling in an Eddying Regime, Geophysical Monograph Series Volume 177, American Geophysical Union, Washington, D.C., 2008, 409 pp.
- 20 Harley, C. D. G., Anderson, K. M., Demes, K. W., Jorve, J. P., Kordas, R. L., Coyle, T. A. and Graham, M. H. Effects of climate change on global seaweed communities. Journal of Phycology. 2012. 48: 1064–1078.
- 21 Blum, J., Le Dimet, F.-X., and Navon, I. M.: Data assimilation for geophysical fluids, in: Computational Methods for the Atmosphere and the Oceans, edited by: Ciarlet, P. Temam G., R., and Tribbia J. Handbook of Numerical Analysis, Elsevier, Oxford, UK, 2008. Vol. 14 (1075). P. 385–442.
- 22 Марчук Г.И., Патон Б.Е., Коротаев Г.К., Залесный В.Б. Информационно-вычислительные технологии – новый этап развития оперативной океанографии // Изв. РАН, Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49. № 6. С. 629-742.
- 23 Булгаков С.Н. Формирование крупномасштабной циркуляции и стратификации вод Чёрного моря. Роль потоков плавучести. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 1996. 243 с.

- 24 Korotaev G. K., Oguz T., Nikiforov A., Koblinsky C.R. Seasonal, interannual and mesoscale variability of the Black Sea upper layer circulation derived from altimeter data // *Journal Geophys. Res.* 2003. V. 108. № С. 4. P. 259-265.
- 25 Зацепин А.Г., Кондрашов А.А., Корж А.О. и др. Субмезомасштабные вихри на кавказском шельфе Черного моря и порождающие их механизмы // *Океанология.* 2011. Т. 51. № 4. С. 592-605.
- 26 Дианский Н.А., Фомин В.В., Жохова Н.В., Коршенко А.Н. Расчет течений и распространения загрязнения в прибрежных водах Большого Сочи на основе численного моделирования. *Известия РАН. Физика атмосферы и океана.* 2013. Т. 49. № 6. С. 664–675
- 27 Korotaev G.K., Oguz T., Dorofeev V.L., Demyshev S.G., Kubryakov A.I., Ratner Yu.B. Development of Black Sea nowcasting and forecasting system // *Ocean Sci.*, 2011, Vol. 7, pp. 629-649.
- 28 Knysh V.V., Korotaev G.K., Moiseenko V.A., Kubryakov A.I., Belokopytov V.N., Inyushina N.V., Seasonal and interannual variability of Black Sea hydrophysical fields reconstructed from 1971-1993 reanalysis data, 2011, *Izvestiya - Atmospheric and Ocean Physics*, Volume 47, Issue 3, pp 399 – 411.
- 29 Knysh V.V., Korotaev G.K., Mizyuk A.I., Sarkisyan A.S., Assimilation of hydrological observation data for calculating currents in seas and oceans, 2012, *Izvestiya - Atmospheric and Ocean Physics*, Volume 48, Issue 1, pp 57 – 73.
- 30 <http://www.myocean.eu>
- 31 Полонский А.Б., И.Г. Шокурова, В.Н. Белокопытов. Десятилетняя изменчивость температуры и солености в Черном море. *Мор. гидрофиз. журн.*, 2013, № 6. С.27-41
- 32 Иванов В.А., Фомин В.В. Математическое моделирование динамических процессов в зоне море-суша. НАН Украины, Морской гидрофизический институт. – Севастополь, 2008. 363 с.
- 33 Bates C.C. Rational theory of delta formation // *Bulletin of American Association of Petroleum Geologists.* – 1953. – Vol. 7. – P. 2119-2161.
- 34 Takano K. A complementary note on the diffusion of the seaward flow off the mouth of a river // *Journal of the Oceanography Society of Japan.* 1955. Vol. 11. P. 1-3.
- 35 Ellison T.H., J.S. Turner. Turbulent entrainment in stratified flows // *Journal of Fluid Mechanics.* 1959. Vol. 6. P. 423-448.
- 36 Залогин Б.С., Родионов Н.А. Устьевые области рек СССР. М.: Мысль, 1969. 312 с.
- 37 Ryther, J.H., D.W. Menzel, N. Corwin. Influence of the Amazon River outflow on the ecology of the western tropical Atlantic. I. Hydrography and nutrient chemistry // *Journal of Marine Research.* 1967. Vol. 25. P. 69-83.

- 38 Wright L.D., J.M. Coleman. Effluent expansion and interfacial mixing in the presence of a salt wedge, Mississippi River delta / L.D. Wright, // *Journal of Geophysical Research*. 1971. Vol. 76. P. 8649-8661.
- 39 Garvine R.W. Physical features of the Connecticut River outflow during high discharge // *Journal of Geophysical Research*. 1974. Vol. 79. P. 831-846.
- 40 Garvine R.W., J.D. Monk. Frontal structure of a river plume // *Journal of Geophysical Research*. 1974. Vol. 79. P. 2251-2259.
- 41 Федоров К.Н. Физическая природа и структура океанических фронтов. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 296 с.
- 42 Garvine R.W. Dynamics of small-scale oceanic fronts // *Journal of Physical Oceanography*. 1974. Vol. 4. P. 557-569.
- 43 Грузинов В.М. Фронтальные зоны Мирового океана. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 197 с.
- 44 Bowman M.J. Spreading and mixing of the Hudson river effluent into the New York Bight // *Hydrodynamics of Estuaries and Fjords*. – 1978. – P. 373-386.
- 45 Kao T.W. The dynamics of oceanic fronts. Part 2: Shelf water structure due to freshwater discharge // *Journal of Physical Oceanography*. 1981. Vol. 11. P. 1215-1223.
- 46 O'Donnell J., R.W. Garvine. A time dependent, two-layer frontal model of buoyant plume dynamics // *Tellus*. 1983. Vol. 35A. P. 73-80.
- 47 Garvine R.W. Estuary plumes and fronts in shelf waters: A layer model // *Journal of Physical Oceanography*. 1987. Vol. 17. P. 1877-1896.
- 48 O'Donnell J. The formation and fate of a river plume: A numerical model // *Journal of Physical Oceanography*. 1990. Vol. 20. P. 551-569.
- 49 Garvine R.W. A dynamical system of classifying buoyant coastal discharges // *Continental Shelf Research*. 1995. Vol. 15. P. 1585-1596.
- 50 Garvine R.W. Frontal jump conditions from models of shallow buoyant surface layer hydrodynamics // *Tellus*. 1981. Vol. 33. P. 301-312.
- 51 Chapman D.C., S.J. Lentz. Trapping of a coastal density front by the bottom boundary layer // *Journal of Physical Oceanography*. 1994. Vol. 24. P. 1464-1479.
- 52 Yankovsky A.E., D.C. Chapman A simple theory for the fate of buoyant coastal discharges // *Journal of Physical Oceanography*. 1997. Vol. 27. P. 1386-1401.
- 53 Chao S.Y., Boicort W.G. Onset of estuarine plumes // *Journal of Physical Oceanography*. 1986. Vol. 16. P. 2137-2149.
- 54 Huq P. The role of Kelvin number on bulge formation from estuarine buoyant outflow // *Estuaries and Coasts*. 2009. Vol. 32. P. 709-719.



- 55 Доронин Ю.П., Лукьянов С.В. Математическое моделирование взаимодействия морской и речной воды на устьевом взморье с помощью двухслойной модели // *Метеорология и гидрология*. 1994. Вып. 10. С. 70-77.
- 56 Horner-Devine A.R. Laboratory experiments simulating a coastal river inflow // *Journal of Fluid Mechanics*. 2006. Vol. 555. P. 203-232.
- 57 Nof D., T. Pichevin. The ballooning of outflows. // *Journal of Physical Oceanography*. 2001. Vol. 31. P. 3045-3058.
- 58 Fong D.A., W.R. Geyer. The alongshore transport of freshwater in a surface-trapped river plume // *Journal of Physical Oceanography*. 2002. Vol. 32. P. 957-972.
- 59 Garvine R.W. Penetration of buoyant coastal discharge onto the continental shelf: a numerical model experiment // *Journal of Physical Oceanography*. 1999. Vol. 27. P. 1892-1909.
- 60 Choi B.J., J.L. Wilkin. The effect of wind on the dispersal of the Hudson River plume // *Journal of Physical Oceanography*. 2006. Vol. 37. P. 1878-1897.
- 61 Nash D.B. Effective sediment-transporting discharge from magnitude-frequency analysis // *Journal of Geology*. 1994. Vol. 102. P. 79-95.
- 62 Chao S.Y. River-forced estuarine plume // *Journal of Physical Oceanography*. 1988. Vol. 18. P. 72-88.
- 63 Simpson J.H. Physical processes in the ROFI regime // *Journal of Marine Systems*. 1997. Vol. 12. P. 3-15.
- 64 Zavialov P.O., A.G. Kostianoy, O.O. Möller Jr. SAFARI cruise: mapping river discharge effects on southern Brazilian shelf // *Geophysical Research Letters*. 2003. Vol. 30. P. 21.
- 65 Horner-Devine A.R., D.A. Fong. The dependence of river plume dynamics and transport on inflow angle // *Environmental Fluid Mechanics Laboratory*. San Francisco: Stanford University, 2004, 21 p.
- 66 Korotenko K.A. Particle tracking method in the approach for prediction of oil slick transport in the sea: modelling oil pollution resulting from river input // *Journal of Marine Systems*, 2004, v. 48, p. 159-170.
- 67 Marchuk G.I., Zalesny V.B. A numerical technique for geophysical data assimilation problem using Pontryagin's principle and splitting-up method // *Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling*, 1993, v. 8, p. 311-326
- 68 Marchuk G.I., Rusakov A.S., Zalesny V.B., Diansky N.A., Splitting Numerical Technique with Application to the High Resolution Simulation of the Indian Ocean Circulation. *Pure appl. Geophys.* 2005. V. 162, p. 1407-1429.

- 69 Zalesny V.B., G.I. Marchuk, V.I. Agoshkov, A.V. Bagno, A.V. Gusev, N.A. Diansky, S.N. Moshonkin, R.Tamsalu, E.M. Volodin. Numerical simulation of large-scale ocean circulation based on multicomponent splitting method. Russian journal of numerical analysis and mathematical modeling. 2010. V. 25, N. 6, P. 581-609.
- 70 Zalesny V.B., A.V. Gusev, V.O. Ivchenko, R. Tamsalu, R. Aps. Numerical model of the Baltic Sea circulation. Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. 2013. V. 28, N. 1, P. 85–100.
- 71 Zalesny V.B. Mathematical model of sea dynamics in a  $\sigma$ -coordinate system. Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling. 2005. V. 20, No 1, p. 97-113.
- 72 Марчук Г.И.. Методы расщепления для решения нестационарных задач. Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1995. Т.35, № 6, p. 843–849.
- 73 Zalesny V.B., Gusev A.V., Mathematical model of the World ocean dynamics with algorithms of variational assimilation of temperature and salinity fields. Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling. 2009. V. 24, No 2, 171-190.
- 74 Mogensen, K., M. Balmaseda and A. T. Weaver. The NEMOVAR ocean data assimilation system as implemented in the ECMWF ocean analysis for System 4. ECMWF Technical Memorandum, 2012. No. 668.
- 75 Zalesny V.B., A.V. Gusev, S.Yu. Chernobay, R. Aps, R.E. Tamsalu, P. Kujala, J. Rytönen. The Baltic Sea circulation modelling and assessment of marine pollution. Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. 2014. V. 29, N. 2, P. 129–138.
- 76 Берсенева Г.П., Т.Я.Чурилова, Л.В.Георгиева (2004) Сезонная изменчивость хлорофилла и биомассы фитопланктона в западной части Черного моря. // Океанология. 44 (3), С. 211-219.
- 77 NASA Landsat Data Continuity Mission Brochure. 2013 г.
- 78 Gentemann C. L. Three way validation of MODIS and AMSR - E sea surface temperatures //Journal of Geophysical Research: Oceans. 2014. T. 119. №. 4. С. 2583-2598.
- 79 Dianskii N.A., Galin V.Ya., Gusev A.V., Volodin E.M., Iakovlev N.G., Smyshlyaev S.P. The model of the Earth system developed at the INM RAS. Russ. J. Num. Anal. Math. Modelling. 2010. V. 25. N. 5, P. 419–429.

- 80 Pacanovsky R.C., Philander G. Parametrization of vertical mixing in numerical models of the tropical ocean // *J. Phys. Oceanogr.* 1981. V. 11. P. 1442–1451.
- 81 Монин А.С., Обухов А.М. Безразмерные характеристики турбулентности в приземном слое атмосферы // *ДАН СССР.* 1953. Т. 93, № 2. С 223-226.
- 82 С.Н. Мошонкин, В.Б. Залесный, А.В. Гусев, Р. Тамсалу Моделирование турбулентности в задачах циркуляции океана // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2014. Т. 50. № 1. С. 57–69.
- 83 Brydon D., San S., Bleck R. A new approximation of the equation of state for seawater, suitable for numerical ocean models. *J. Geoph. Res.* 1999. V. 104, N. C1. P. 1537–1540.
- 84 Яковлев Н.Г. Восстановление крупномасштабного состояния вод и морского льда Северного Ледовитого океана в 1948-2002 гг. Часть 1: Численная модель и среднее состояние // *Известия РАН, ФАО,* 2009. Т. 45, № 3. С.1-16.
- 85 Briegleb В.Р., Bitz С.М., Hunke Е.С., Lipscomb W.Н., Holland M.М., Schramm J.L., and Moritz R.Е. Scientific description of the sea ice component in the Community Climate System Model, version three. Technical Note NCAR/TN-463+STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, 2004.
- 86 Hunke E.C and J.K. Dukowicz. An elastic-viscous-plastic model for sea ice dynamics // *J. Phys. Oceanogr.* 1997. V. 27. P. 1849–1867.
- 87 Marchuk G.I. Splitting and alternative direction methods: in *Handbook of Numerical Analysis*, Ed. By P.G. Ciarlet and J.L. Lions. North-Holland, Amsterdam, 1990, V. 1, P. 197–462.
- 88 Arakawa A., Lamb V.R. A potential enstrophy and energy conserving scheme for shallow water equations // *Mon. Wea. Rev.* 1981. V. 109. P. 18–36.
- 89 «Нормативы качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативы предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения». Утверждено Приказом Федерального агентства по рыболовству от 18.01.2010 г.
- 90 Современные методы гидрохимических исследований океана. М., Институт океанологии им. П.П.Ширшова АН СССР, 1992. 200 с.
- 91 Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши (под ред. А.Д.Семенова). Л.: Гидрометеиздат. 1977. 542 с.