

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

УТВЕРЖДАЮ

№ госрегистрации 114112770059

Зам.директора ИО РАН

_____ А.В. Соков

« ____ » _____ 2015 г.

ОТЧЕТ

О ПРИКЛАДНЫХ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Исследование технологии мониторинга и прогнозирования экологического
состояния водной среды морского шельфа

по теме:

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
(промежуточный)

Этап 2

ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям
развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы»

Соглашение о предоставлении субсидии от 23 июня 2014 г. № 14.604.21.0044

Научный руководитель

доктор физ.-мат. наук

А.Г. Зацепин

Москва 2015

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Научный руководитель темы, д-р физ.-мат. наук	_____	А.Г.Зацепин (введение, заключение, разделы 1-5)
Исполнители темы:		
Ведущий научный сотрудник, канд. геогр. наук	_____	А.Г. Островский (раздел 1, 3, 9, 10)
Научный сотрудник	_____	В.Б. Пиотух (раздел 1, 8, 9)
Младший научный сотрудник	_____	К.П. Сильвестрова (раздел 1, 8, 10)
Младший научный сотрудник	_____	А.А. Петрига (раздел 3, 8, 10)
Младший научный сотрудник	_____	А.А. Недоспасов (раздел 2, 8-10)
Ведущий научный сотрудник, канд. биол. наук	_____	Е.Г. Арашкевич (раздел 3, 7, 8)
Научный сотрудник, канд. биол. наук	_____	Н.Д. Романова (раздел 1, 8, 11)
Старший научный сотрудник, канд. биол. наук	_____	С.А. Мошаров (раздел 2, 7, 9, заключение)
Заведующий отделом, канд. геогр. наук	_____	С.Б. Куклев (раздел 3, 7-12)
Ведущий научный сотрудник, канд. геогр. наук	_____	Б.В. Дивинский (раздел 1, 6)
Заведующий лабораторией, канд. геогр. наук	_____	В.К. Часовников (раздел 7, 8)
Старший научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук	_____	О.И. Подымов (раздел 7, 8)
Заместитель директора, д-р геогр. наук	_____	П.О. Завьялов (раздел 1, 5, 8, 10)
Старший научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук	_____	А.А. Осадчиев (раздел 8, 10)
Научный сотрудник	_____	В.В. Пелевин (раздел 4, 8, 10)
Научный сотрудник	_____	А.С. Ижицкий (раздел 9, 10)
Ведущий научный сотрудник, д-р физ.-мат. наук	_____	В.Б. Залесный (раздел 1, 6)
Научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук	_____	А.В. Гусев (раздел 1, 6)
Старший научный сотрудник	_____	С.Г. Поярков (раздел 1, 4)
Нормоконтролер	_____	С.А. Мошаров

РЕФЕРАТ

Отчет 192 с., 118 рис., 8 табл., 45 источник, 5 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 2 выполнен анализ спутниковой информации и метеорологических данных для северо-восточной части Черного моря. Проведена предварительная обработка данных многоканальных оптико-электронных спутниковых сканеров SEVIRI и MODIS и получен массив расчетных значений температуры поверхности моря и концентрации хлорофилла «а» на регулярной сетке. Выполнен анализ распределений ключевых параметров водной среды на акватории подспутникового полигона по результатам натурных исследований. Разработана методика учета дневного хода температуры по данным сканера SEVIRI. Выполнена валидация регионального алгоритма восстановления концентрации хлорофилла «а» на основе сопоставления спутниковых данных и контактных измерений. Проведены численные расчеты циркуляции вод Черного моря с улучшенным разрешением у побережья Геленджика в районе полигона ИОРАН и их верификация на основе сопоставления с данными измерений и спутниковой информацией. Разработана схема функциональной структуры системы мониторинга экологического состояния водной среды шельфа Черного моря на основе интеграции спутниковой информации, данных контактных измерений и результатов численного моделирования. Проведен анализ результатов контактных

измерений с помощью автономных измерительных комплексов на подспутниковом полигоне в шельфово-склоновой зоне Черного моря.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	9
1 Анализ спутниковой информации и метеорологических данных для северо-восточной части Черного моря	14
1.1 Анализ спутниковой информации для северо-восточной части Черного моря	14
1.2 Регулярный сбор и анализ метеорологических данных над акваторией полигона	35
1.2.1 Типы атмосферных синоптических процессов и разномасштабная изменчивость ветрового режима	36
1.2.2 Оценки корреляции динамических и термических факторов	43
1.2.3 Влияние ветрового режима на формирование структуры и циркуляции вод прибрежной зоны	44
1.2.4 Характеристики ветра, температуры воздуха, воды и осадков в январе-апреле 2015 г.	48
2 Предварительная обработка данных многоканальных оптико-электронных спутниковых сканеров SEVIRI и MODIS и получение массива расчетных значений температуры поверхности моря и концентрации хлорофилла «а» на регулярной сетке	52
2.1 Данные сканера SEVIRI	52
2.2 Данные сканера MODIS	61
3 Анализ распределений ключевых параметров водной среды на акватории подспутникового полигона по результатам натурных исследований	64
3.1 Описание подспутникового полигона ио ран	64
3.2 Материалы и методы	65
3.3 Сезонный и годовой ход основных гидрофизических параметров (температура, соленость, плотность) в районе исследований с 2010 по 2014 год	65
4 Разработка методики учета дневного хода температуры по данным сканера SEVIRI	81
5 Валидация регионального алгоритма восстановления концентрации хлорофилла «а» на основе сопоставления спутниковых данных и контактных измерений	84
6 Численные расчеты циркуляции вод черного моря с улучшенным разрешением у побережья Геленджика в районе полигона ИОРАН и их верификация на основе сопоставления с данными измерений и спутниковой информацией	88
6.1 Расчеты с использованием модели ИВМ РАН	88
6.1.1 Модель циркуляции Чёрного моря с улучшенным пространственным разрешением прибрежной зоны	90
6.1.2 Постановка численного эксперимента	91
6.1.3 Воспроизведение крупномасштабной циркуляции	92
6.1.4 Динамические процессы в прибрежной зоне высокого разрешения	101
6.2 Численные расчеты на основе модели MIKE	107
6.2.1 Решение задачи численных расчетов	107
6.2.2 Результаты адаптации программного комплекса MIKE к условиям Геленджикского побережья в районе полигона ИОРАН	108
7 Разработка схемы функциональной структуры системы мониторинга экологического состояния водной среды шельфа Черного моря на основе интеграции спутниковой информации, данных контактных измерений и результатов численного моделирования ..	120

8 Приобретение вычислительной техники для обработки и анализа данных спутниковых и подспутниковых наблюдений (работа индустриального партнера).....	125
9 Проведение анализа результатов контактных измерений с помощью автономных измерительных комплексов на подспутниковом полигоне в шельфово-склоновой зоне Черного моря.....	127
9.1 Описание выполненных работ	127
9.2 Сезонный ход характеристик скорости течения по данным ADCP RDI на кабеле (2013-2014 гг.).....	131
9.3 Анализ данных ADCP и AWAC с целью исследования фазовых сдвигов наблюдавшихся колебаний /волн.....	138
10 Участие в мероприятиях, направленных на освещение и популяризацию промежуточных результатов ПНИ	155
Заключение.....	156
Список использованных источников.....	159
Приложение А. Методика учета дневного хода температуры по данным сканера SEVIRI.....	163
Приложение Б. Откорректированный региональный алгоритм восстановления концентрации хлорофилла «а», адаптированный для Черного моря	169
Приложение В. Схема функциональной структуры системы мониторинга экологического состояния водной среды шельфа Черного моря на основе интеграции спутниковой информации, данных контактных измерений и результатов численного моделирования.....	175
Приложение Г. Результаты контактных измерений с помощью автономных измерительных комплексов на подспутниковом полигоне в шельфово-склоновой зоне Черного моря..	181
Приложение Д. Отчет об участии в мероприятиях, направленных на освещение и популяризацию промежуточных результатов ПНИ	191

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящем отчете о НИР использованы ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 4202-75 Реактивы. Калий йодноватокислый. 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 плум – 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:

СТД-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 2-го этапа выполнения ПНИ – теоретические и экспериментальные исследования систем и методов мониторинга морской среды с помощью спутниковой информации, численного моделирования основных гидродинамических процессов, автономных и судовых систем измерений.

Задачи 2-го этапа:

- 1) Анализ спутниковой информации и метеорологических данных для северо-восточной части Черного моря.
- 2) Предварительная обработка данных многоканальных оптико-электронных спутниковых сканеров SEVIRI и MODIS и получение массива расчетных значений температуры поверхности моря и концентрации хлорофилла «а» на регулярной сетке.
- 3) Анализ распределений ключевых параметров водной среды на акватории подспутникового полигона по результатам натурных исследований.
- 4) Разработка методики учета дневного хода температуры по данным сканера SEVIRI.
- 5) Валидация регионального алгоритма восстановления концентрации хлорофилла «а» на основе сопоставления спутниковых данных и контактных измерений.
- 6) Численные расчеты циркуляции вод Черного моря с улучшенным разрешением у побережья Геленджика в районе полигона ИОРАН и их верификация на основе сопоставления с данными измерений и спутниковой информацией.

7) Разработка схемы функциональной структуры системы мониторинга экологического состояния водной среды шельфа Черного моря на основе интеграции спутниковой информации, данных контактных измерений и результатов численного моделирования.

8) Проведение анализа результатов контактных измерений с помощью автономных измерительных комплексов на подспутниковом полигоне в шельфово-склоновой зоне Черного моря.

Решение задач 2-го этапа обеспечивает методическую и информационную основу для выполнения общей цели ПНИ.

1 АНАЛИЗ СПУТНИКОВОЙ ИНФОРМАЦИИ И МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ

1.1 Анализ спутниковой информации для северо-восточной части Черного моря.

В рамках текущих исследовательских работ на геленджикском полигоне продолжается многолетний спутниковый мониторинг непосредственно заданного района и прилегающих к нему акваторий. Регулярность получения спутниковой информации в оптическом и инфракрасном диапазоне обеспечивается ежедневным приемом и обработкой данных сенсора MODIS, а детальный анализ ситуации и выявление мелкомасштабных динамических структур проводится с помощью сенсоров высокого разрешения, установленных на спутниках серии Landsat.

Спектрорадиометр MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) является одним из ключевых инструментов на борту американских спутников серии EOS (Terra (EOS AM-1) и Aqua (EOS PM-1)). MODIS имеет 36 спектральных каналов с 12-битным радиометрическим разрешением в видимом, ближнем, среднем и тепловом инфракрасном диапазонах. Он осуществляет постоянную съемку поверхности Земли с периодом от 1 до 2 дней, из 36 каналов два канала (1, 2) имеют пространственное разрешение 250 метров, 5 каналов (3-7) имеют разрешение 500 м, остальные каналы (8-36) обладают пространственным разрешением 1000 м. Полоса обзора сенсора MODIS составляет порядка 2330 км.

Для комплексного использования в работах на полигоне наибольший интерес представляют значения поверхностной температуры, рассчитанные с использованием композиционной методики NASA по данным ИК-каналов сенсора, а так же оптические характеристики концентрации взвеси и содержания хлорофилла в поверхностном слое моря, объединяемые понятием «цвет моря», которые вычисляются по рекомендованным NASA алгоритмам, учитывающим значения в нескольких каналах видимого диапазона. Комбинация данных о поле температуры, цвете моря и других оптических свойствах морской поверхности, получаемых с радиометров MODIS, позволяет получать информацию о распределении взвеси, концентрации хлорофилла, цветении вод, ТПМ, а также о полях течений в акватории полигона. Сигнал, регистрируемый датчиками в оптическом диапазоне, определяется рассеянием на гидрозоле (фитопланктоне и взвешенных минеральных частицах), а также отраженным от поверхности солнечным излучением (наиболее сильно проявляющемся в зоне солнечного блика). Гидрозоли можно рассматривать как пассивные трассеры поверхностных течений и формируемые ими фронтальные зоны, как правило, соответствуют линиям тока. Таким образом, анализ

снимков позволяет одновременно выделять акватории с повышенной концентрацией взвешенного вещества или цветением вод, а также основные мезомасштабные структуры, определяющие поле течений в изучаемом районе.

Исходные файлы с вышеупомянутыми данными, так называемые базовые продукты 2-го уровня (Level 2), с пространственным разрешением 1 км загружаются с разработанного NASA портала OceanColor в режиме близком к реальному времени пролета спутников. Кроме того, в отдельных случаях с целью получения данных более высокого пространственного разрешения используются рассчитанные по трехканальной композиционной методике цветные синтезированные изображения MODIS в формате Truecolor, загружаемые с портала MODIS-Subsets, так же разработанного NASA. Разрешение этих снимков составляет около 250 метров по поверхности. Для получения данных, пригодных для анализа и последующего использования в проекте, был разработан автоматизированный алгоритм, позволяющий быстро геокодировать и картировать загружаемые с серверов NASA данные, который дает возможность оперативной обработки большого массива информации с выдачей конечных результатов в виде графических карт интересующих параметров, градуированных по шкале псевдоцветов с наложением топоосновы, географической сетки и атрибутивной информации. Выходные продукты данного алгоритма готовы как для непосредственного анализа исследователями, так и для последующего усвоения в пользовательских геоинформационных системах. В результате многолетней работы собрана большая подборка спутниковых тематических карт интересующих параметров для северо-восточной части Черного моря.

Несмотря на достаточную периодичность получения снимков MODIS (по 1-2 изображения в сутки с каждого спутника Terra и Aqua), наблюдения в оптическом и ИК диапазонах нередко ограничиваются облачностью над интересующей акваторией, особенно в холодное время года, а так же что касается видимого диапазона недостаточно высоким уровнем регистрируемого отраженного сигнала в зимнее время для получения существенных наблюдаемых неоднородностей в поверхностном слое моря. С этой точки зрения для получения информативных спутниковых карт были предпочтительны безоблачные периоды в теплое время года, а так же периоды интенсивного цветения водорослей в поверхностном слое моря, периоды таяния снегов и интенсивных речных стоков, изменяющие оптические характеристики морской поверхности на прилегающей акватории и вызывающие повышение уровня регистрируемого отраженного сигнала. Таким образом, ограничение по облачности для данного района носит сезонный характер - в летние месяцы, а в иные годы так же поздней весной и ранней осенью количество облачных дней намного меньше, чем в холодное время года, соответственно соотношение

облачных и безоблачных дней меняется от зимы к лету. Анализ собранного за последние 5 лет архива спутниковой информации позволил численно оценить это соотношение, результаты приведены в таблице 1.

Собранная информация в графическом виде представлена на рисунках 1.1-1.6.

Таблица 1.1 – Количество безоблачных дней над полигоном по годам и месяцам

Год	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2010	4	2	7	13	15	10	18	19	11	6	8	3
2011	4	3	6	8	7	10	11	19	19	5	8	3
2012	1	5	7	9	8	19	14	17	20	10	7	4
2013	3	5	5	7	13	8	15	13	5	10	9	8
2014	1	5	5	6	5	7	15	14	8	11	5	2

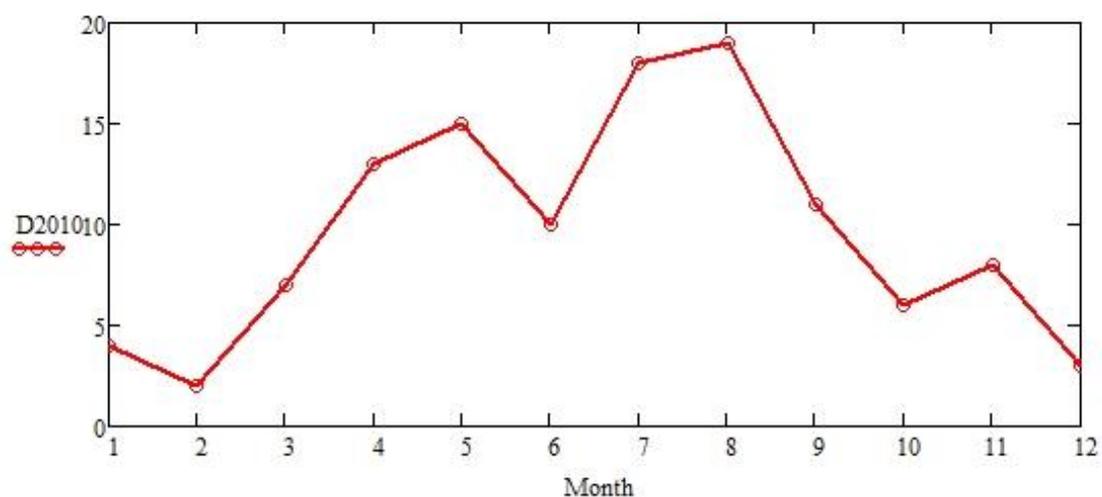


Рисунок 1.1 – Распределение количества безоблачных дней по месяцам в 2010 г.

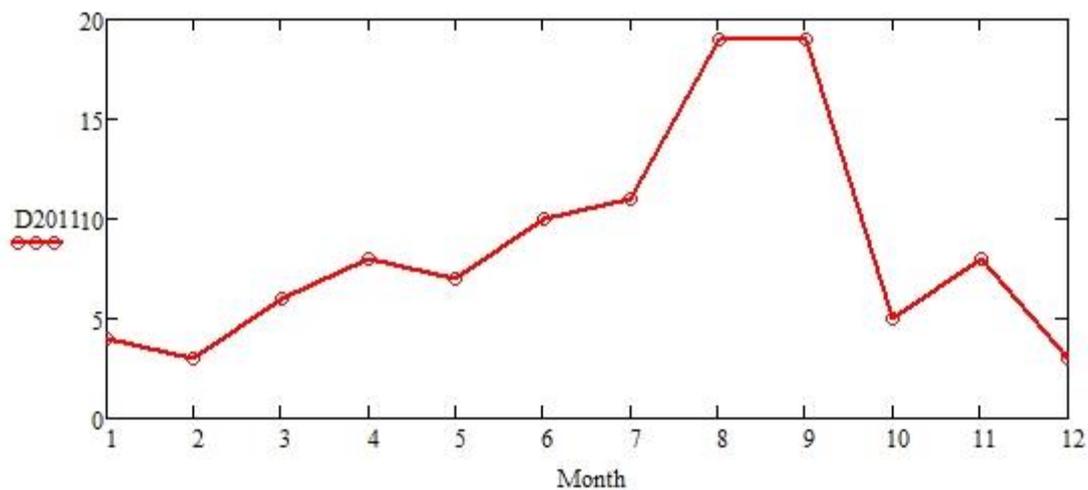


Рисунок 1.2 – Распределение количества безоблачных дней по месяцам в 2011 г.

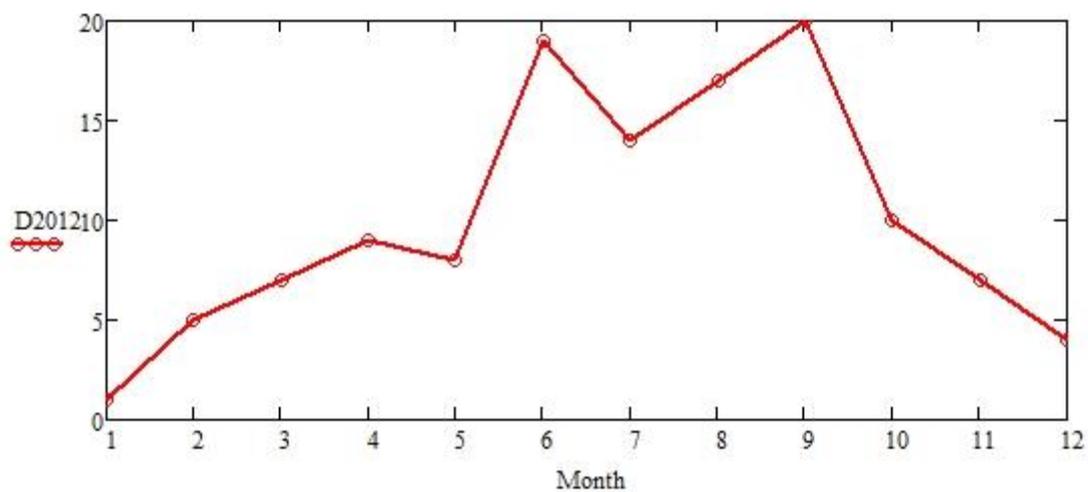


Рисунок 1.3 – Распределение количества безоблачных дней по месяцам в 2012 г.

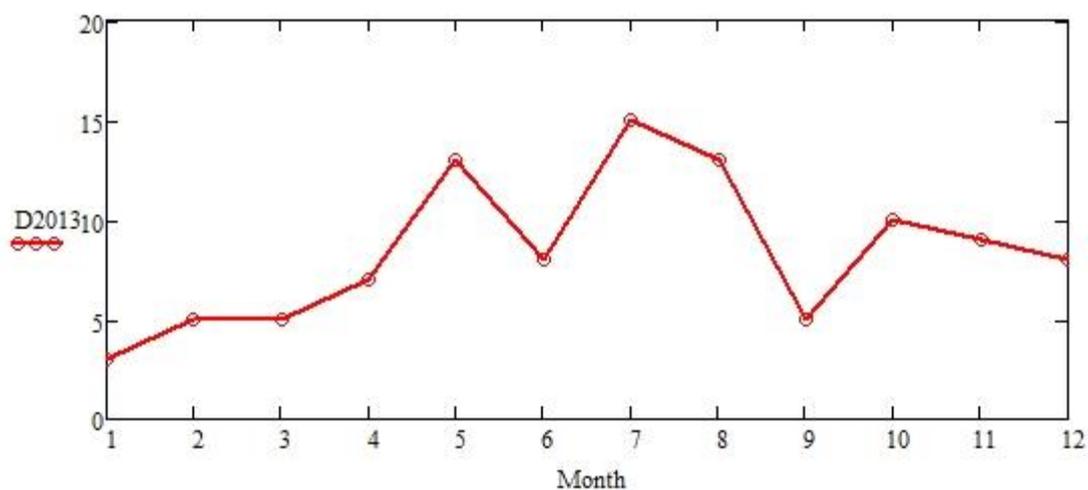


Рисунок 1.4 – Распределение количества безоблачных дней по месяцам в 2013 г.

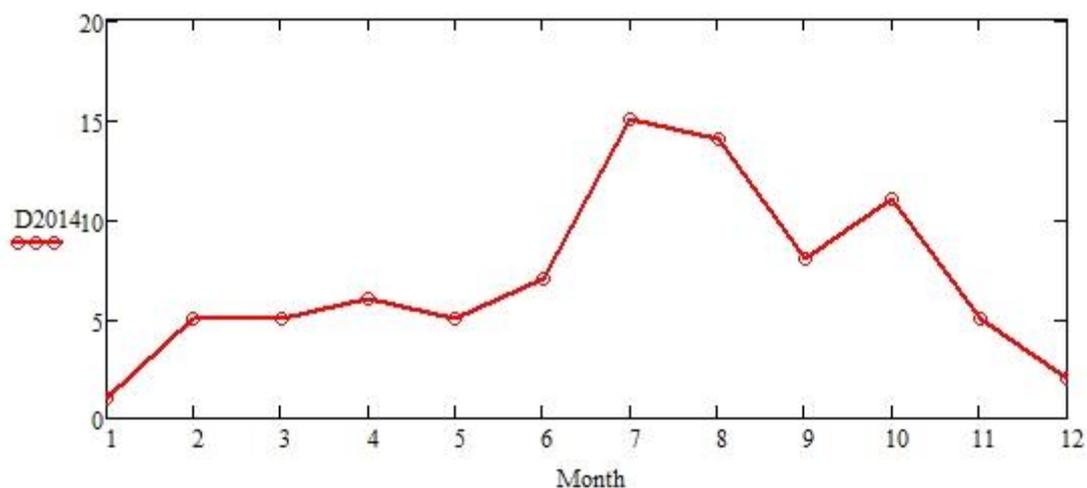


Рисунок 1.5 – Распределение количества безоблачных дней по месяцам в 2014 г.

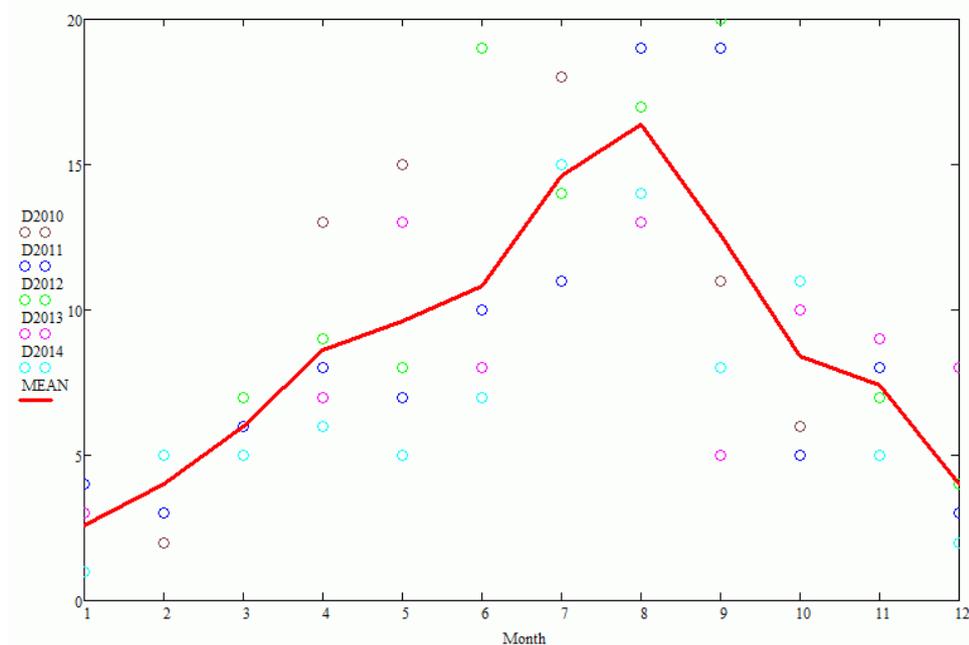


Рисунок 1.6 – Распределение средних значений количества безоблачных дней по месяцам в 2010-2014 гг.

Наряду с облачностью сезонный характер носит и возможность наблюдения тех или иных эффектов и неоднородностей на подстилающей поверхности, на основе которых можно судить об особенностях прибрежной динамики в районе полигона. Многолетний опыт использования данных ДЗЗ в работах на полигоне, а так же большой массив собранной в последние годы разнородной спутниковой информации позволяет выделить наиболее характерные случаи такого их применения. С точки зрения наблюдения динамических структур наибольший интерес, естественно, представляют случаи больших контрастов при пространственном распределении тех или иных параметров, которые мы можем измерять и картировать при помощи дистанционных методов. Так, в зимние месяцы,

а так же ранней весной, когда возможности пассивной спутниковой радиометрии для изучения морской поверхности сильно ограничены ненастной погодой, контрасты на поверхности моря, наблюдаемые в оптическом или ИК диапазоне, обычно невелики. На рисунке 1.7 представлена типичная картина однородного распределения температуры поверхности моря (ТПМ) в зимний период, по которой трудно судить о каких-либо динамических структурах в районе полигона.

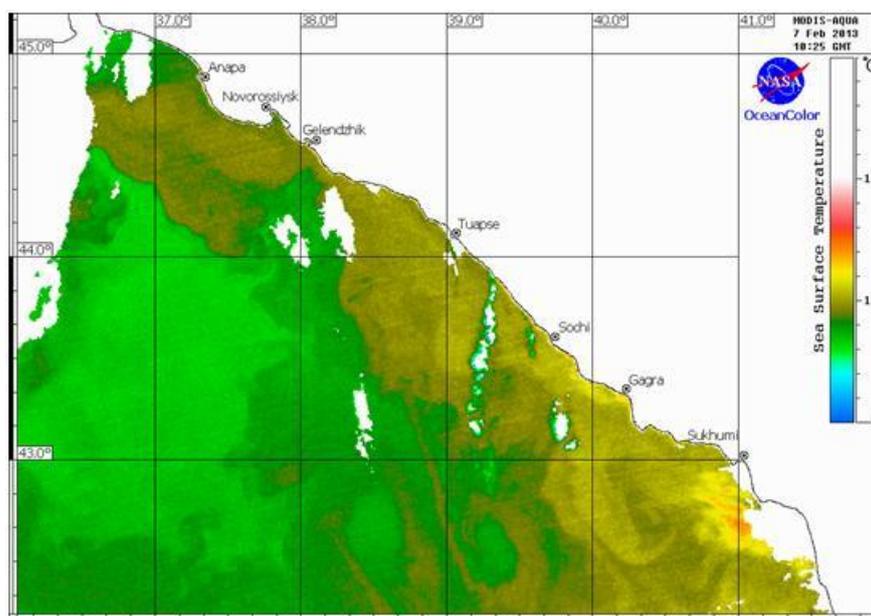


Рисунок 1.7 – Распределение температуры поверхности моря по данным MODIS-Aqua за 7 февраля 2013 г.

При отсутствии внешних возмущающих факторов, которые будут рассмотрены ниже, похожая картина наблюдается и при наблюдениях в оптическом диапазоне, типичный пример для распределения хлорофилла приведен на рисунке 1.8.

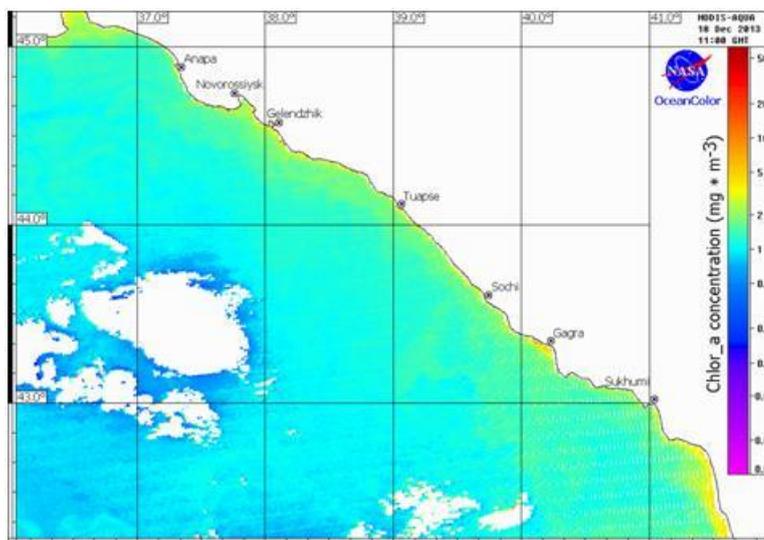


Рисунок 1.8 – Распределение CHL-a по данным MODIS-Aqua за 18 декабря 2013 г.

Интерес в данном случае представляет лишь общий уровень CHL-a на рассматриваемой акватории, который, как будет видно при сравнении с последующими летними примерами, в зимний период существенно выше.

Однако зачастую в зимние месяцы «оживление» контрастов на акватории полигона вносят интенсивные осадки, если после прохождения циклонов выдаются солнечные дни, то особенно в оптическом диапазоне наблюдается картина бурного выноса многочисленных рек и движение богатых взвесью речных вод вдоль всего кавказского побережья, поддерживаемого струей ОЧТ, в том числе и в акватории полигона. Пример оценки концентрации взвеси по измерению восходящей радиации в канале 0.555 мкм MODIS-Aqua приводится на рисунке 1.9. Тут следует отметить, что интенсивные осадки вызывают аналогичное явление и в другие сезоны года. Как правило, в этих случаях наличие больших контрастов именно в прибрежной зоне позволяет наблюдать многочисленные вихревые структуры и оценивать ширину и направление ОЧТ.

В весенние месяцы повышение контрастов в оптических каналах так же вызывается бурными стоками впадающих в Черное море кавказских рек, но уже не в связи с осадками, а вследствие весеннего таяния снегов, особенно в районе ледников Большого Кавказского хребта.

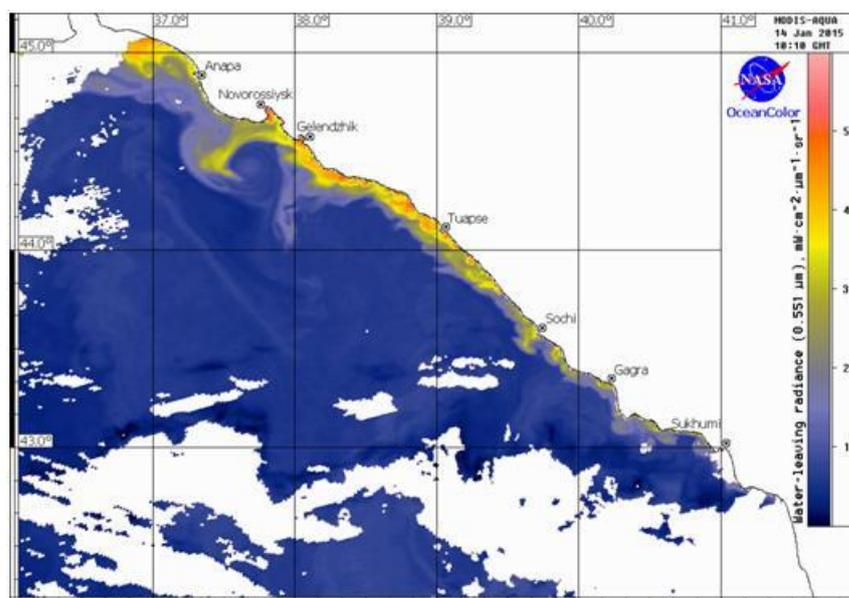


Рисунок 1.9 – Распределение WLR по данным MODIS-Aqua за 14 января 2015 г.

Интенсивность речных стоков, несущих талые ледниковые воды, зачастую существенно выше дождевых, что оказывает влияние практически на всю акваторию северо-западной части моря, это приводит к повышению концентрации взвеси и хлорофилла на больших площадях, возрастанию контрастов их распределения и позволяет отслеживать вихревую динамику не только в прибрежной зоне, но и во всем регионе. Пример такого распределения приводится на рисунке 1.10.

С наступлением теплого времени серьезным фактором, вызывающим повышенную концентрацию взвеси, становится ежегодное «цветение» микроводорослей кокколитофорида. В зависимости от климатических характеристик предшествующей зимы и ветрового воздействия в период майского солнечного прогрева оно носит более или менее интенсивный характер. Характерно, что при повышении концентрации взвеси и увеличении мутности воды в период такого «цветения», значения концентрации хлорофилла остаются на фоновом уровне для данного сезона, это связано с особенностями строения известковых пластинок – кокколита, из которых состоят планктонные водоросли, вызывающие «цветение». Примеры таких наблюдений с использованием данных MODIS-Aqua приводятся на рисунках 1.11 и 1.12. Именно 2012 год отмечен наиболее интенсивным «цветением» за весь период наблюдений на полигоне. Наблюдаемые при этом контрасты позволяют выявлять многочисленные динамические структуры на всей акватории полигона и прилегающих районах.

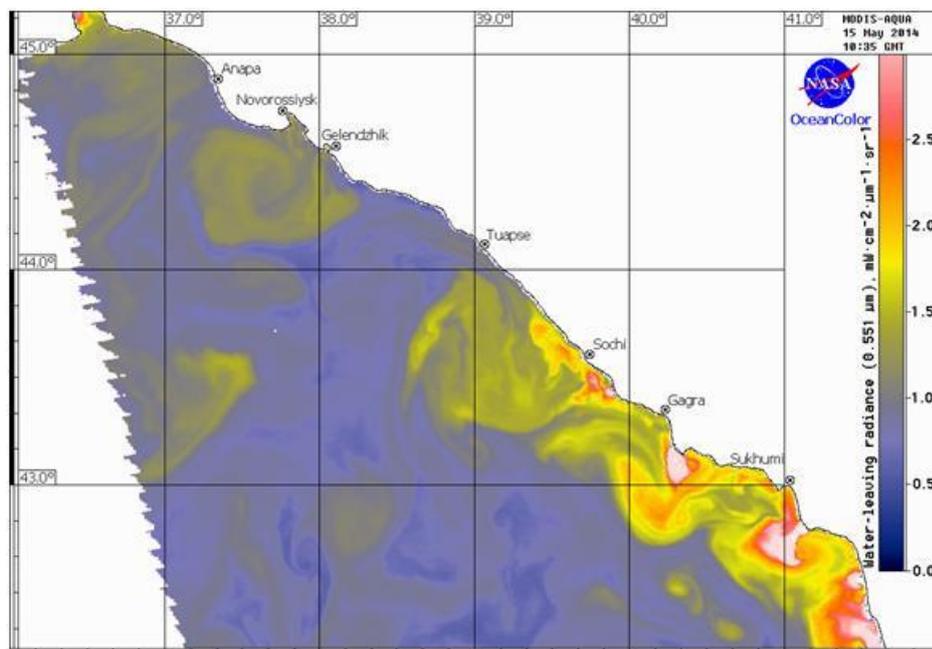


Рисунок 1.10 – Распределение WLR по данным MODIS-Aqua за 15 мая 2014 г.

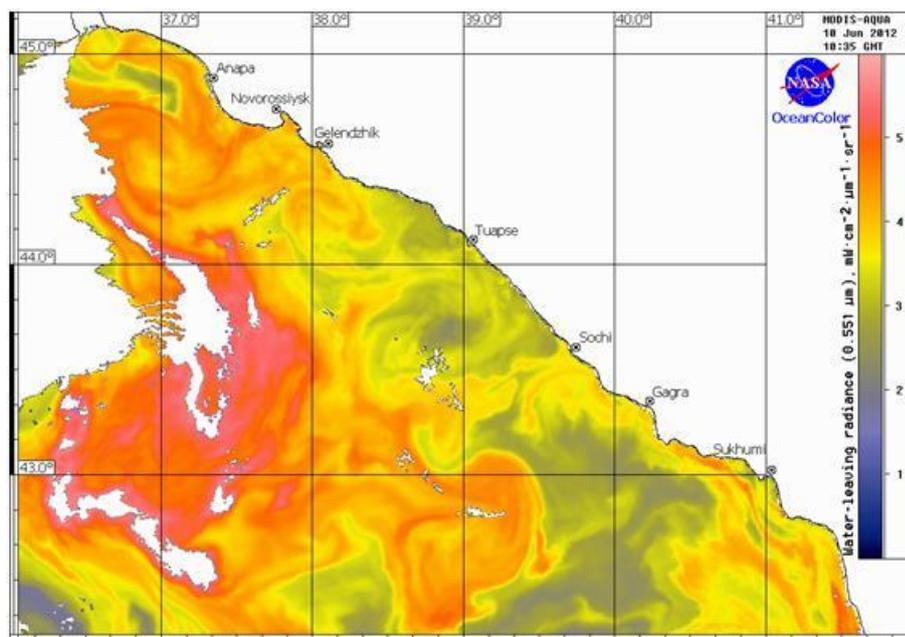


Рисунок 1.11 – Распределение WLR по данным MODIS-Aqua за 10 июня 2012 г.

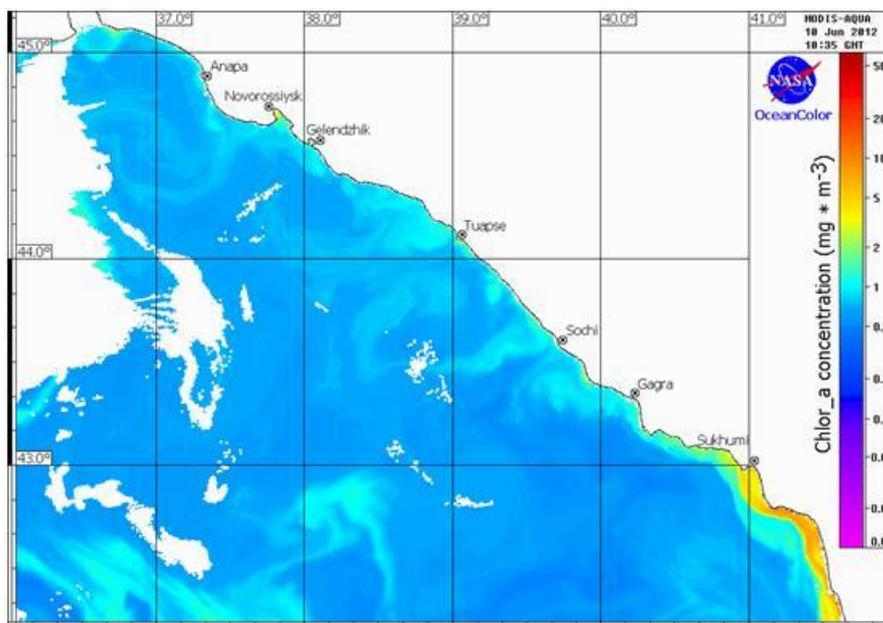


Рисунок 1.12 – Распределение CHL-а по данным MODIS-Aqua за 10 июня 2012 г.

Однако даже самое интенсивное цветение кокколитофоров затухает к концу июня, и в последующие летние месяцы оптические контрасты невелики, как на рисунке 8.

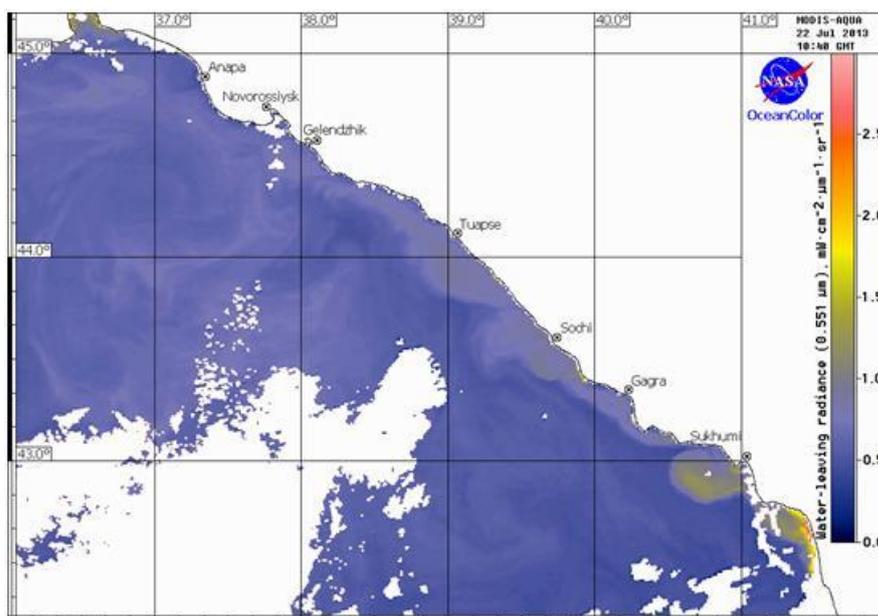


Рисунок 1.13 – Распределение WLR по данным MODIS-Aqua за 22 июля 2013 г.

Что касается использования данных о распределении ТПМ в летние месяцы для наблюдения динамических явлений в районе полигона и прилегающих акваторий, то здесь основным фактором, вызывающим появление температурных контрастов, является апвеллинг, вызываемый соответствующим ветровым воздействием, который можно

наблюдать как в прибрежной зоне, так и на отдаленных от берега участках акватории. Соответствующие примеры приводятся на рисунках 1.14-1.16.

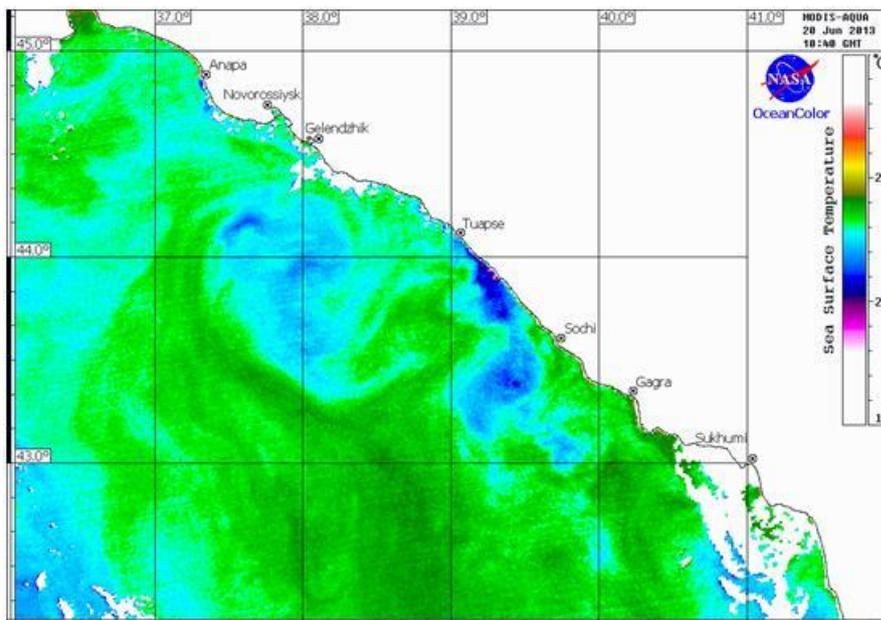


Рисунок 1.14 – Распределение ТПМ по данным MODIS-Aqua за 20 июня 2013 г.

При слабом ветре или штилевой погоде вследствие отсутствия ветрового перемешивания в светлое время суток на картах ТПМ наблюдаются обширные зоны дневного прогрева. Выявление каких-либо динамических характеристик по распределению температуры в таких зонах сильно затруднено. Типичный пример летнего дневного прогрева в районе полигона приводится на рисунке 1.17. Карты оптических характеристик в середине лета так же носят однородный характер, какого-либо внешнего воздействия, вроде интенсивных осадков, сильных ветров или цветения водорослей, могущего вызвать появление контрастов в распределении взвеси или концентрации хлорофилла, обычно не наблюдается, и контрасты оптических параметров в районе полигона как правило невелики. Карта типичного распределения хлорофилла в разгар лета приводится на рисунке 1.18.

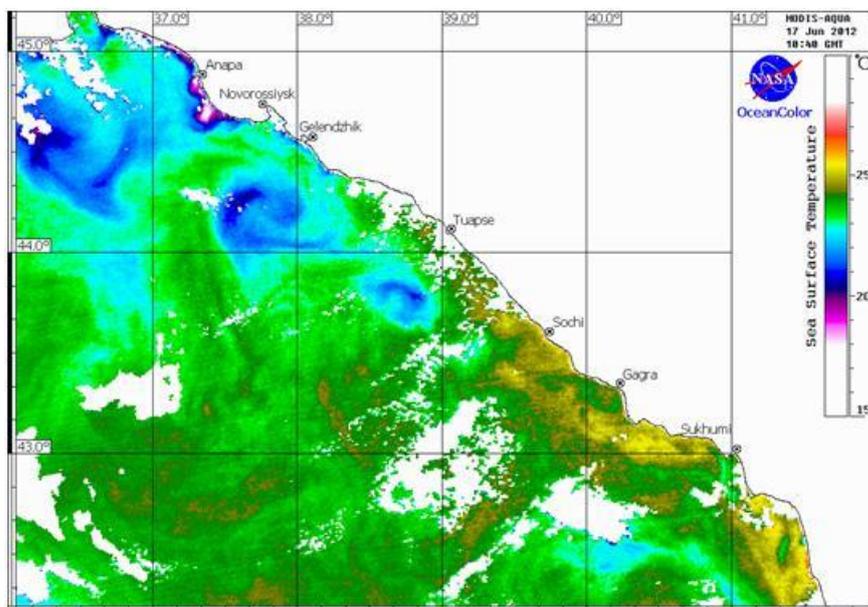


Рисунок 1.15 – Распределение ТПМ по данным MODIS-Aqua за 17 июня 2012 г.

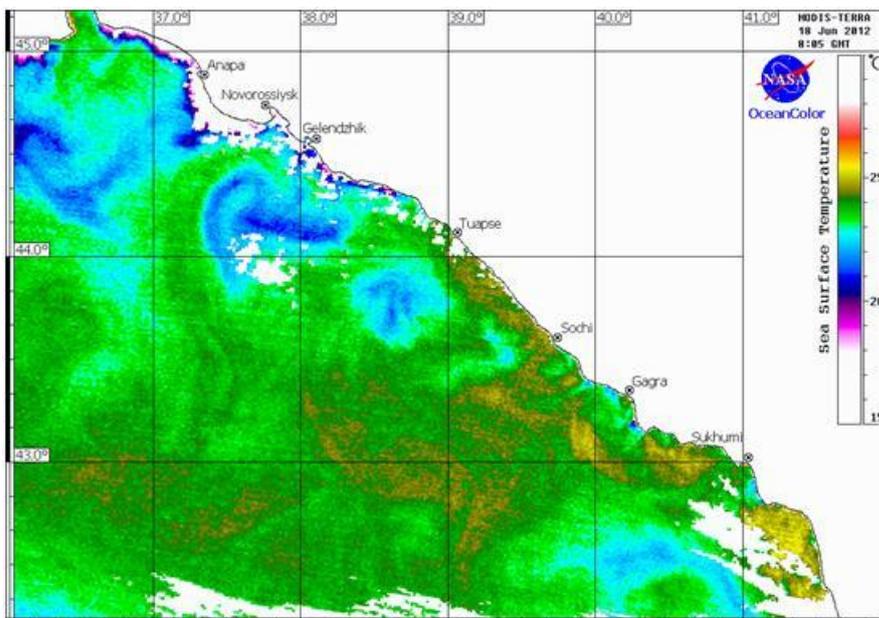


Рисунок 1.16 – Распределение ТПМ по данным MODIS-Terra за 18 июня 2012 г.

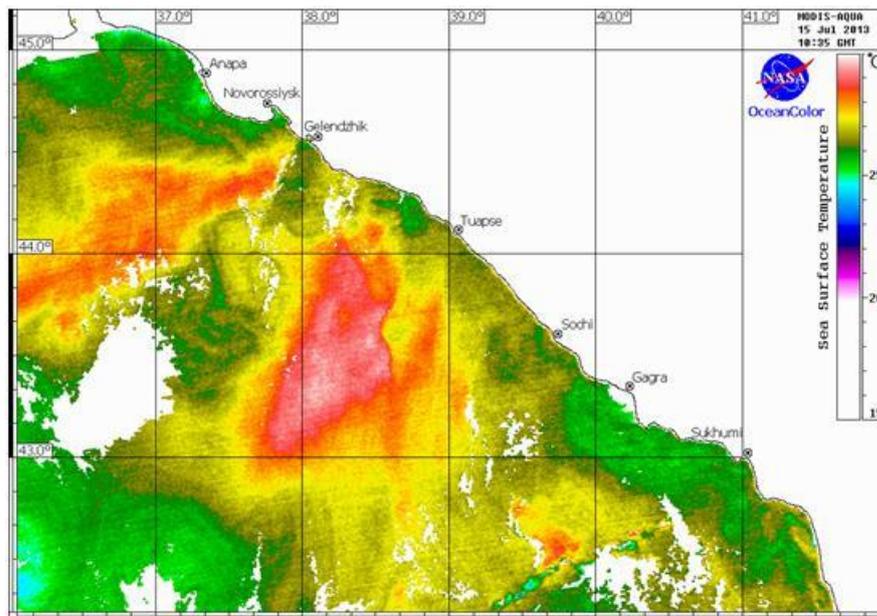


Рисунок 1.17 – Распределение ТПМ по данным MODIS-Aqua за 15 июля 2013 г.

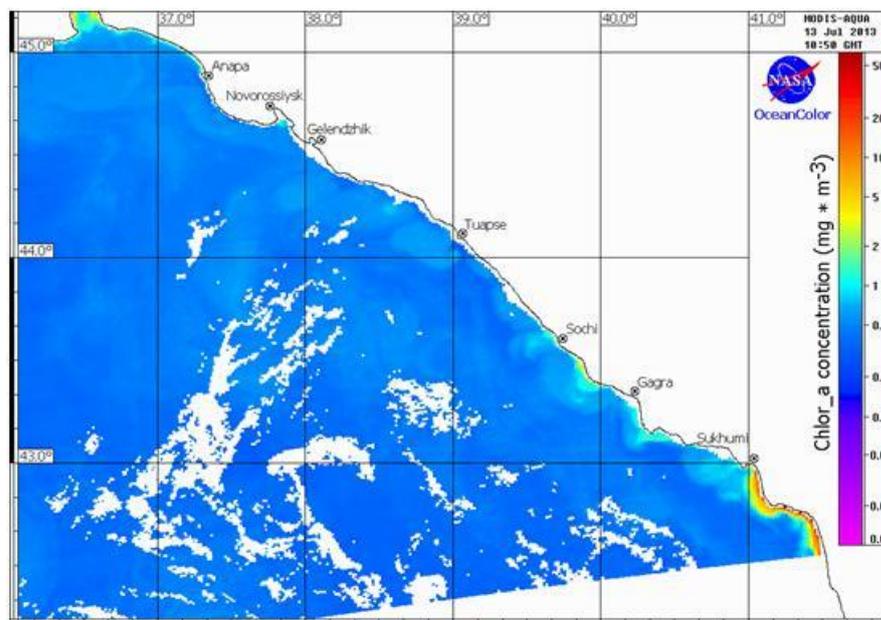


Рисунок 1.18 – Распределение CHL-а по данным MODIS-Aqua за 13 июля 2013 г.

С наступлением осени температурные контрасты на акватории резко возрастают, что связано как с повышением ветрового воздействия, так и с общей перестройкой верхнего квазиоднородного слоя в период осеннего похолодания. Неоднородности температуры в осенние месяцы могут служить прекрасным трассером для выявления многочисленных динамических структур как в прибрежной зоне, так и в открытом море. Типичные примеры распределения ТПМ в этот период приводятся на рисунках 1.19-1.21.

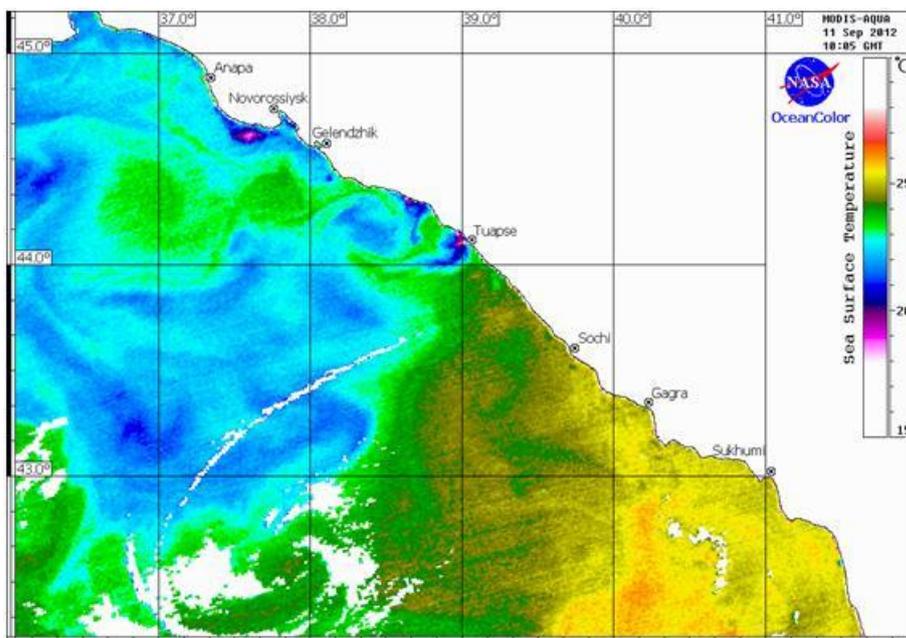


Рисунок 1.19 – Распределение ТПМ по данным MODIS-Aqua за 11 сентября 2012 г.

Увеличение интенсивности осадков осенью приводит к повышению суммарного объема речных стоков, несущих богатые взвесью и хлорофиллом воды, соответственно, это оказывает влияние на распределение этих параметров на рассматриваемой акватории и появлению хороших контрастов в прибрежной зоне, так же позволяющих выявлять особенности вихревой динамики в районе полигона и прилегающих акваторий. Примеры распределения оптических параметров в осенние месяцы приводятся на рисунках 1.22-1.24.

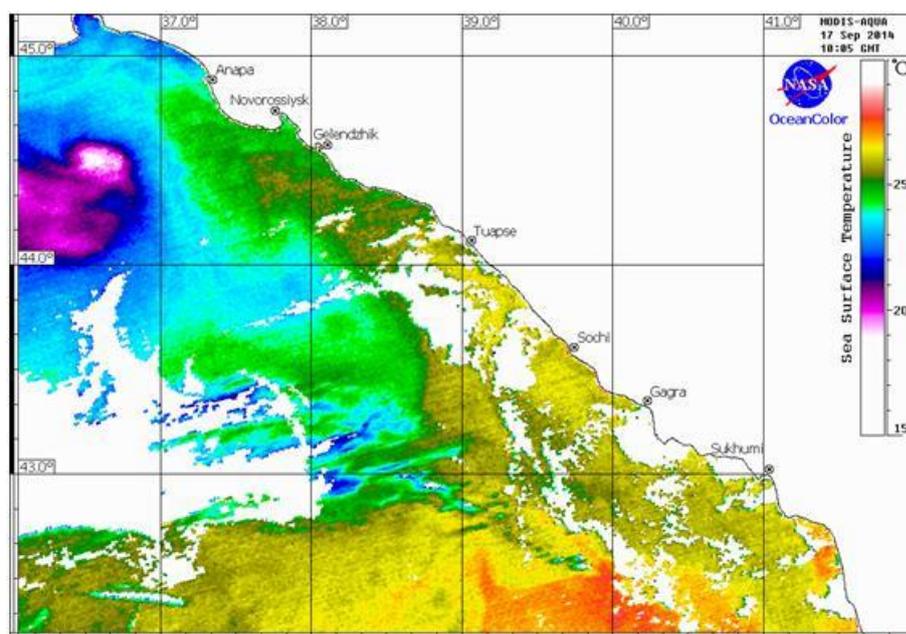


Рисунок 1.20 – Распределение ТПМ по данным MODIS-Aqua за 17 сентября 2013 г.

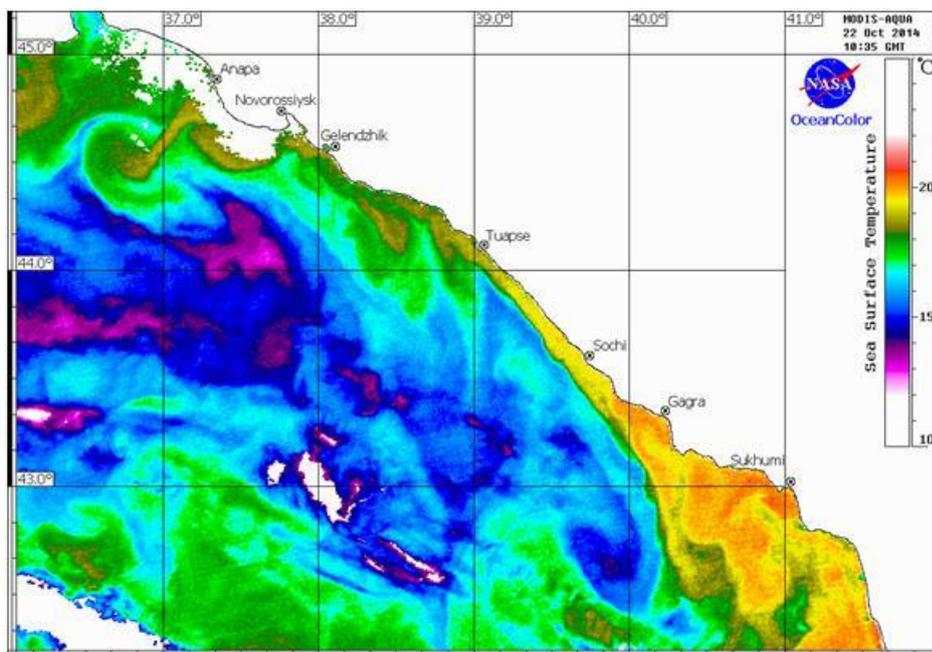


Рисунок 1.21 – Распределение ТПМ по данным MODIS-Аква за 22 октября 2014 г.

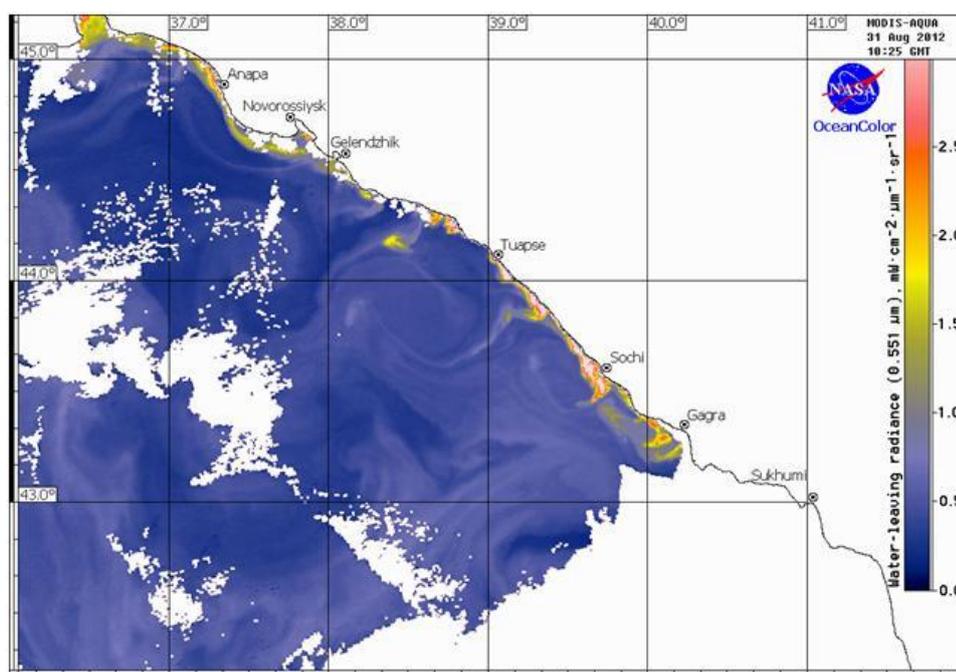


Рисунок 1.22 – Распределение WLR по данным MODIS-Аква за 31 августа 2012 г.

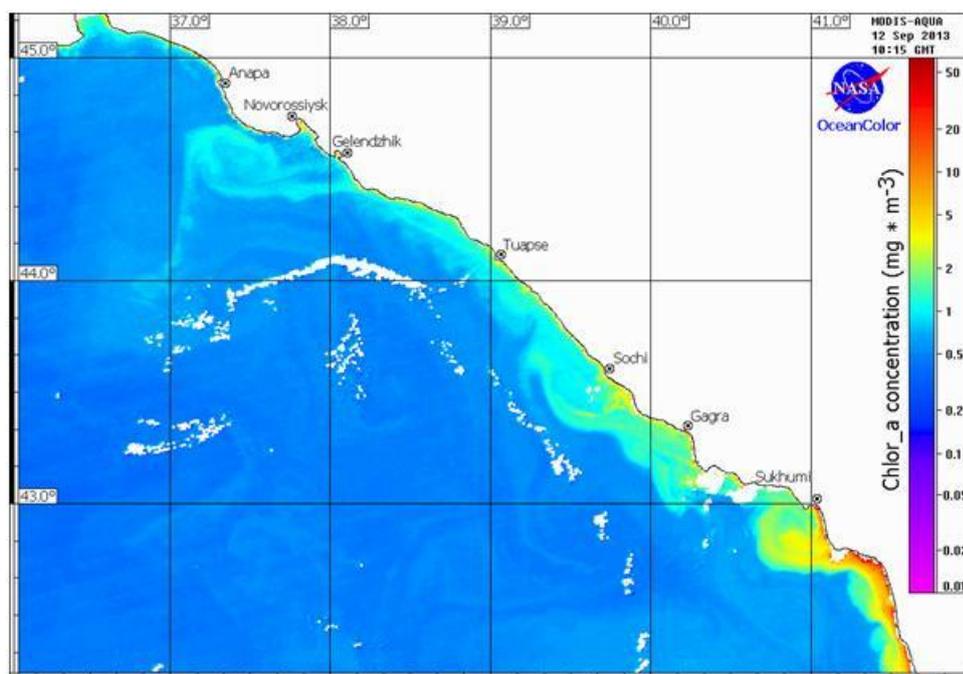


Рисунок 1.23 – Распределение CHL-a по данным MODIS-Aqua за 12 сентября 2013 г.

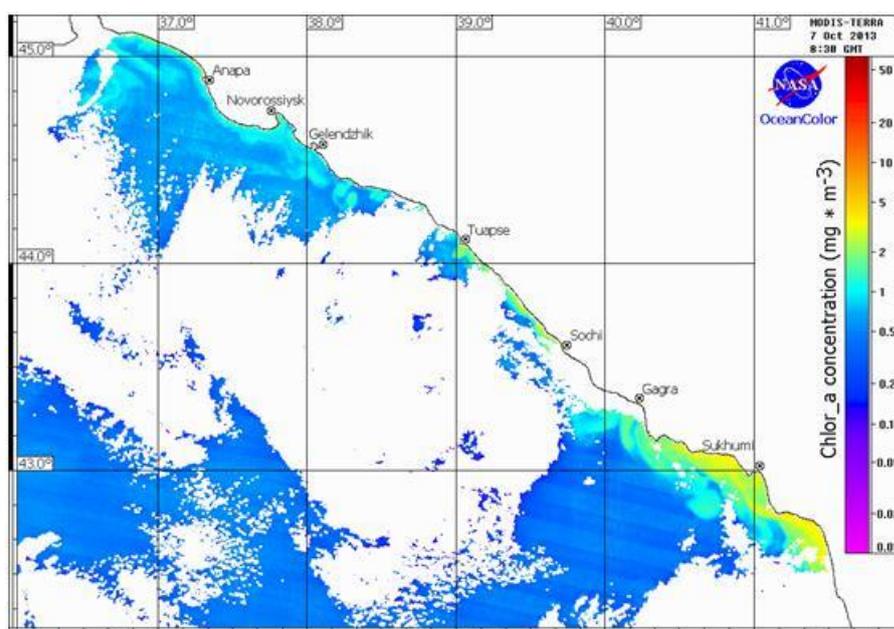


Рисунок 1.24 – Распределение CHL-a по данным MODIS-Terra за 7 октября 2013 г.

Так же осенью представляется интересным наблюдение за поведением струи ОЧТ по ее температурным характеристикам. Переносу струей относительно теплых вод из юго-восточной части Черного моря в район изучаемого полигона могут препятствовать вихревые структуры, образовавшиеся вдоль прибрежной зоны, но при их разрушении или отсутствии вынос теплых вод вдоль акватории полигона происходит вплоть до района Керченского пролива. Интересные примеры наблюдения этих явлений в относительно

короткий осенний период 2014 года приводятся на рисунках 1.25 и 1.26. Вихрь на рисунке 1.25 блокирует движение струи ОЧТ в районе полигона, но после его ухода буквально через 10 дней на рисунке 1.26 наблюдается прорыв струи в район Керченского пролива. Очевидно, что данные наблюдения могут быть проведены исключительно дистанционными методами, что подтверждает необходимость их регулярного комплексного использования для проведения гидрофизических, гидрохимических или гидробиологических исследований выбранного полигона.

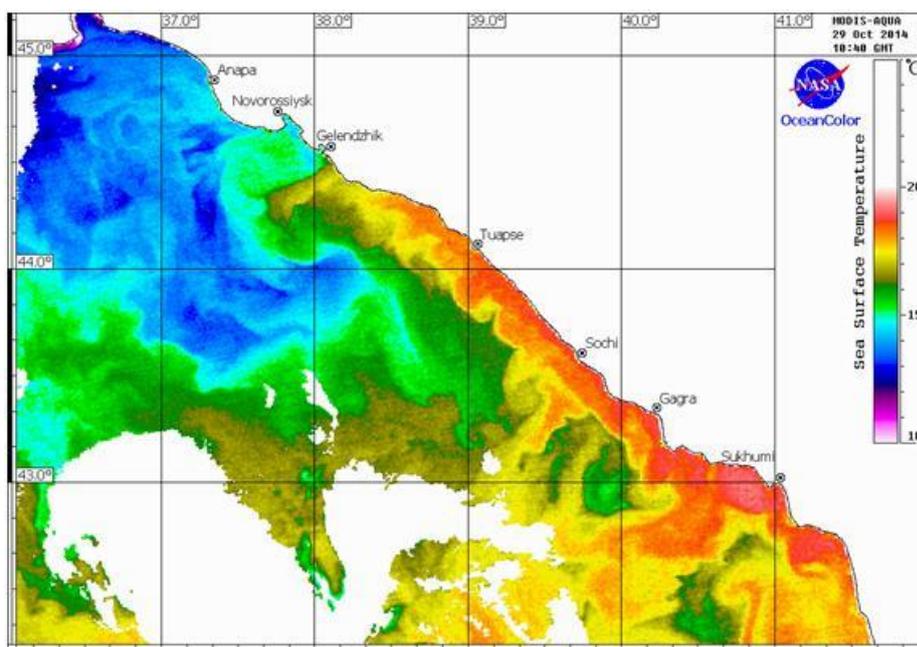


Рисунок 1.25 – Распределение ТПМ по данным MODIS-Аква за 29 октября 2014 г.

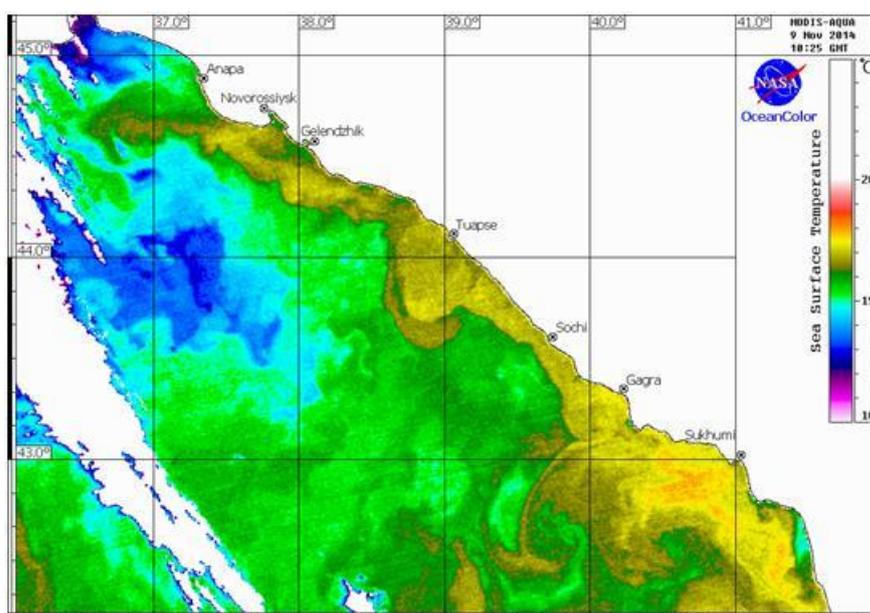


Рисунок 1.26 – Распределение ТПМ по данным MODIS-Аква за 9 ноября 2014 г.

При изучении некоторых рассмотренных выше случаев представляется весьма полезным использовать возможности сенсора MODIS получать данные более высокого разрешения в некоторых каналах видимого диапазона. Так, использование цветосинтезированных изображений на основе комбинаций трех оптических каналов, полученных с портала NASA MODIS-Subsets, позволяет более детально выделить некоторые наблюдаемые явления. На рисунках 1.27 и 1.28 можно наблюдать распределение взвеси непосредственно в районе полигона и характерные контрасты вследствие в одном случае выноса речных стоков при сильных осадках, а во втором вследствие возникшего «цветения» кокколитофорид. В обоих случаях контрасты между мутными и относительно прозрачными водами выявляют интересные особенности прибрежной динамики с максимально возможным для данного сенсора пространственным разрешением.

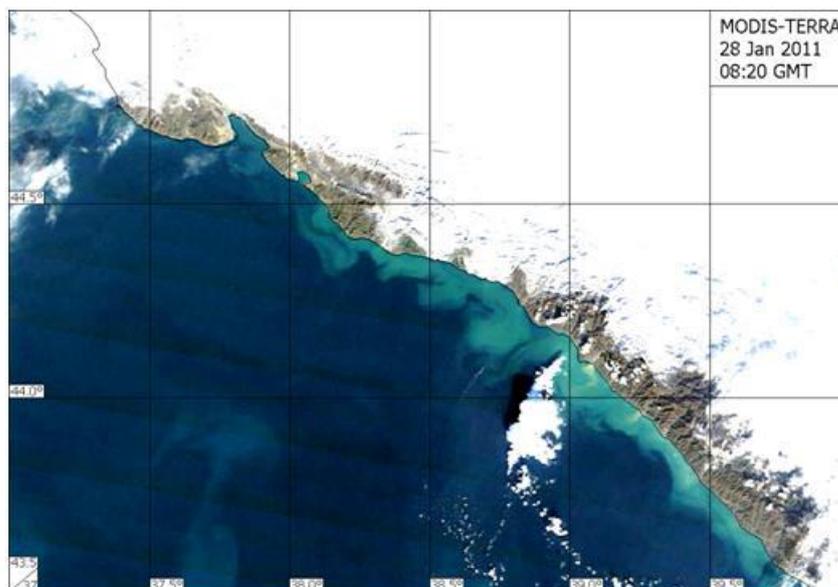


Рисунок 1.27 – Цветосинтезированное изображение MODIS-Terra за 28 января 2011 г.



Рисунок 1.28 – Цветосинтезированное изображение MODIS-Terra за 15 мая 2014 г.

Как упоминалось выше, при удачном стечении обстоятельств возможно получить для изучения динамических характеристик акватории полигона данные высокого (до 30 метров) разрешения по поверхности со спутников серии Landsat, а именно оптические и ИК изображения сенсора TM со спутника Landsat-5, сенсора ETM+ со спутника Landsat-7 и сенсоров OLI и TIRS со спутника Landsat-8. Эти данные могут быть заказаны со специально разработанного портала Earthexplorer в режиме, близком к реальному времени пролета, но возможность их получения ограничивается нерегулярностью, то есть редкими пролетами спутников над исследуемым полигоном (раз в 16 дней) и связанной с этим высокой вероятностью попадания подходящего фрейма в зону сплошной облачности. В целом, возможно получение в среднем около 10 пригодных для анализа снимков Landsat в течение года, преимущественно в малооблачные летние месяцы. Вследствие лучшего практически в 10 раз разрешения по сравнению с сенсором MODIS как оптические, так и температурные карты непосредственно района полигона позволяют выявлять весьма мелкомасштабные динамические особенности, недоступные вследствие своих небольших размеров для наблюдения с сенсора MODIS даже с его максимальным разрешением.

Учитывая специфику изучаемого полигона, а именно его небольшие размеры и ограниченный диапазон действий на судне по буксировке измерительной аппаратуры или постановке стационарных зондирующих приборов именно снимки со спутников серии Landsat являются наиболее полезными для комплексного усвоения вместе с данными, получаемые контактным способом. Так, наблюдаемые на рисунке 1.29 и 1.30 мелкомасштабные вихревые структуры попадают в район, доступный для изучения контактными методами, и могут быть идентифицированы с помощью буксируемых или

стационарных датчиков, используемых в работах на полигоне. Это же относится к снимкам в ИК диапазоне, по которым рассчитывается ТПМ, на которых возможно выявление небольших по размеру апвеллингов или детальные особенности струи ОЧТ в районе полигона.

Примеры таких снимков приводятся на рисунках 1.31 и 1.32.

В рамках расширения использования данных ДЗЗ для исследования полигона в дальнейшем планируется привлечение радиолокационных снимков высокого разрешения с прибора C-SAR спутника Sentinel-1, выкладываемых для свободного доступа на портале SciHub, разработанного Европейским космическим агентством. Эти данные могут быть использованы для оценки влияния ветрового воздействия на акваторию полигона, а так же для выявления поверхностно-активных веществ, образуемых в результате сброса ГСМ с проходящих судов или принесенных струей ОЧТ речных стоков.

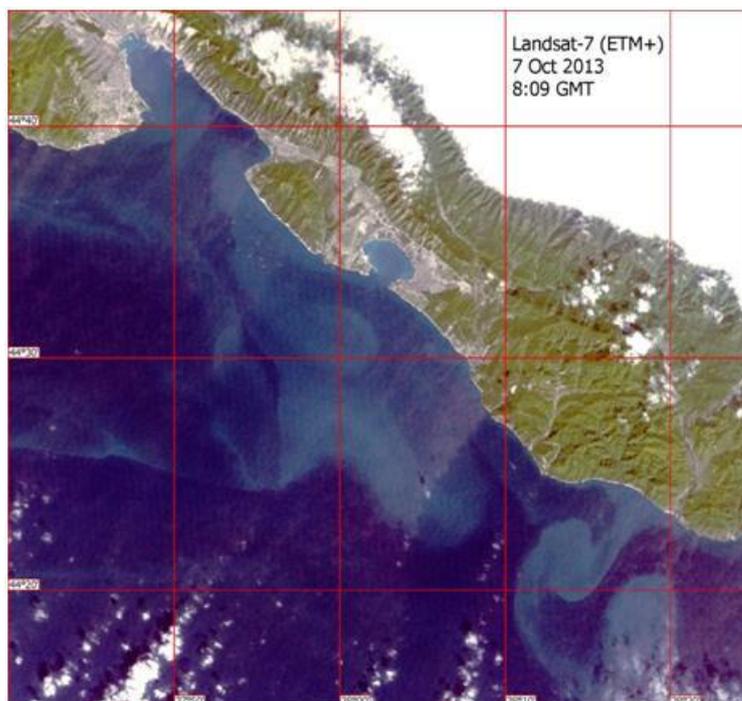


Рисунок 1.29 – Цветосинтезированное изображение Landsat-7 (ETM+) за 7 октября 2013 г.

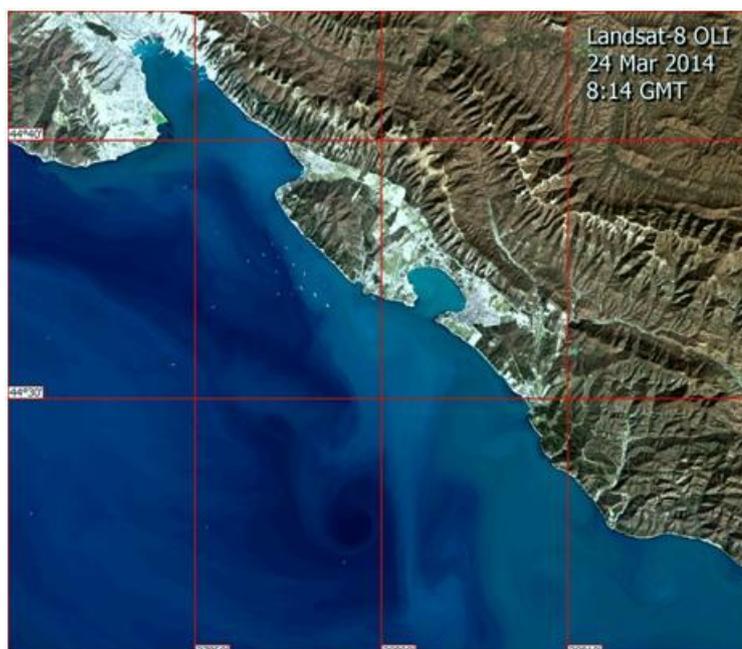


Рисунок 1.30 – Цветосинтезированное изображение Landsat-8 (OLI) за 24 марта 2014 г.

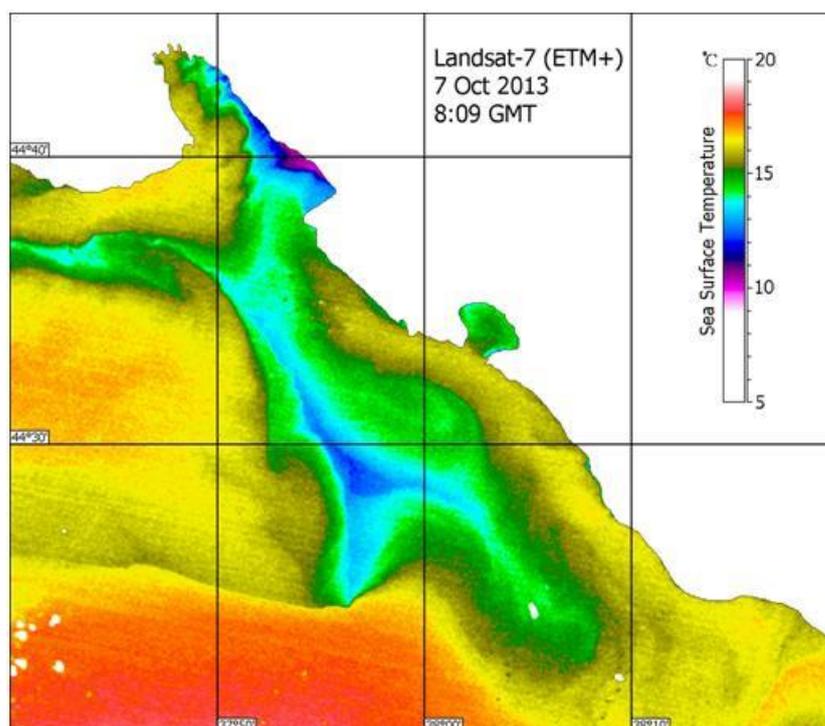


Рисунок 1.31 – Карта рассчитанной ТПМ по данным Landsat-7 (ETM+) за 7 октября 2013 г.

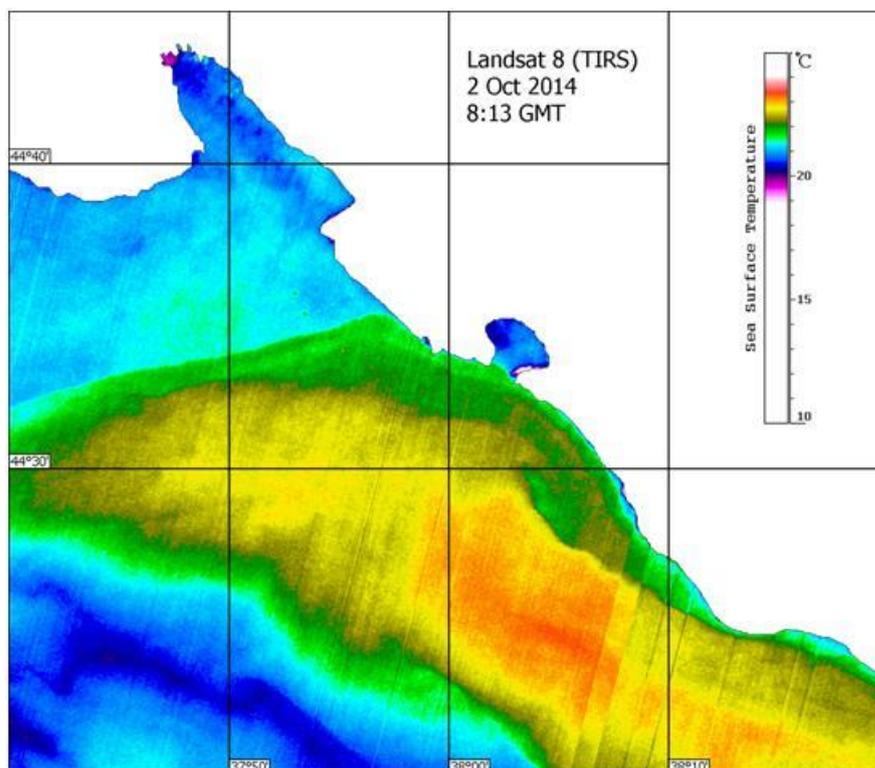


Рисунок 1.32 – Карта рассчитанной ТПМ по данным Landsat-8 (TIRS) за 2 октября 2014 г.

1.2 Регулярный сбор и анализ метеорологических данных над акваторией полигона

При анализе процессов взаимодействия в системе атмосфера - море возникает задача систематизации разномасштабных атмосферных условий. Комплексные исследования последних лет на стандартном полигоне показывают существенную синхронность изменений состояния гидрофизической, гидрохимической, биологической и экологической компонент экосистемы прибрежной зоны с долговременной изменчивостью атмосферных синоптических процессов и ветрового режима. Это подтверждается синхронностью изменений прогрессивных векторных диаграмм ветра, временного хода температуры и отклонений температуры от среднемноголетней по отдельным пунктам Северо-Квказского побережья, а также синхронными изменениями структуры, циркуляции и горизонтального и вертикального водообмена прибрежных вод с водами центральной зоны дивергенции.

Кроме того, проводимые в последние годы комплексные исследования, позволили показать синхронность изменений гидрохимических параметров и состояния биологической компоненты экосистемы (возможность исчезновения или появления новых видов при климатических изменениях окружающей среды). Анализ разномасштабной изменчивости ветрового режима и термических факторов позволяет также

интерпретировать данные спутниковой информации. Для анализа метеорологических данных используются стандартные данные метеостанции г. Геленджика и метеостанции, расположенной на причале ЮО ИОРАН. Метеорологические данные обобщаются, обрабатываются графически и анализируются в лаборатории гидрофизики и моделирования ЮО ИОРАН.

В данном разделе рассматриваются особенности изменчивости ветрового режима за период 1935-2014 гг. Более подробно исследуется разномасштабная изменчивость метеоусловий в последние годы (2010-2014 гг.), различные по своим температурным градациям. Для визуализации временных рядов направления и скорости ветра использовался метод прогрессивных векторных диаграмм. Градации годов по температуре воздуха определялись по отклонениям годовых температур от среднемноголетних по ряду наблюдений с 1935 по 2014 гг., в соответствии с оценками среднемноголетнего среднеквадратического отклонения σ . Так, при разности температур в пределах $\pm\sigma$ годы считались умеренно-теплыми (УТ) и умеренно-холодными (УХ), в интервале от $\pm\sigma$ до $\pm 2\sigma$ – теплыми и холодными (Т и Х), более $\pm 2\sigma$ – аномально теплыми и аномально холодными (АТ и АХ). Приведенные в статье вертикальные разрезы температуры воды по месяцам за период 2010-2014 гг. представлены по результатам зондирования CTD-зондом Sea Bird 19+ (НИС «Ашамба»). Зондирования проводились ежемесячно (примерно в 5-ти морских милях от берега) в точке стандартного разреза на траверзе Голубой бухты ($44^{\circ}31.203'$ с.ш. и $37^{\circ}54.260'$ в.д.).

В результате сбора, анализа и обобщения метеорологических данных последних лет и анализа многолетних метеорологических данных, получены новые результаты по следующим разделам:

- 1) типы атмосферных синоптических процессов и разномасштабная изменчивость ветрового режима;
- 2) оценки корреляции динамических и термических факторов;
- 3) Влияние ветрового режима на формирование структуры и циркуляции вод прибрежной зоны;
- 4) Характеристики ветра, температуры воздуха, воды и осадков в январе-апреле 2015 г.;
- 5) Характеристики атмосферных температурных трендов за период 1935-2015 гг.

1.2.1 Типы атмосферных синоптических процессов и разномасштабная изменчивость ветрового режима

Вследствие того, что Черное море расположено в районе активного взаимодействия отрогов и вихрей нескольких глобальных крупномасштабных барических антициклонических и циклонических образований (Азорский, Сибирский, Арктический антициклоны, NAO, Норвежское и Северное моря, тропическая депрессия) над отдельными частями Черного моря преобладают различные типы атмосферных процессов. По преобладающим типам атмосферных процессов в Черном море выделяют северо-западную, центральную, северо-восточную, юго-западную и юго-восточную части моря. В северо-восточной части Черного моря преобладают СВ и ЮВ типы атмосферных процессов (рис. 1.33).

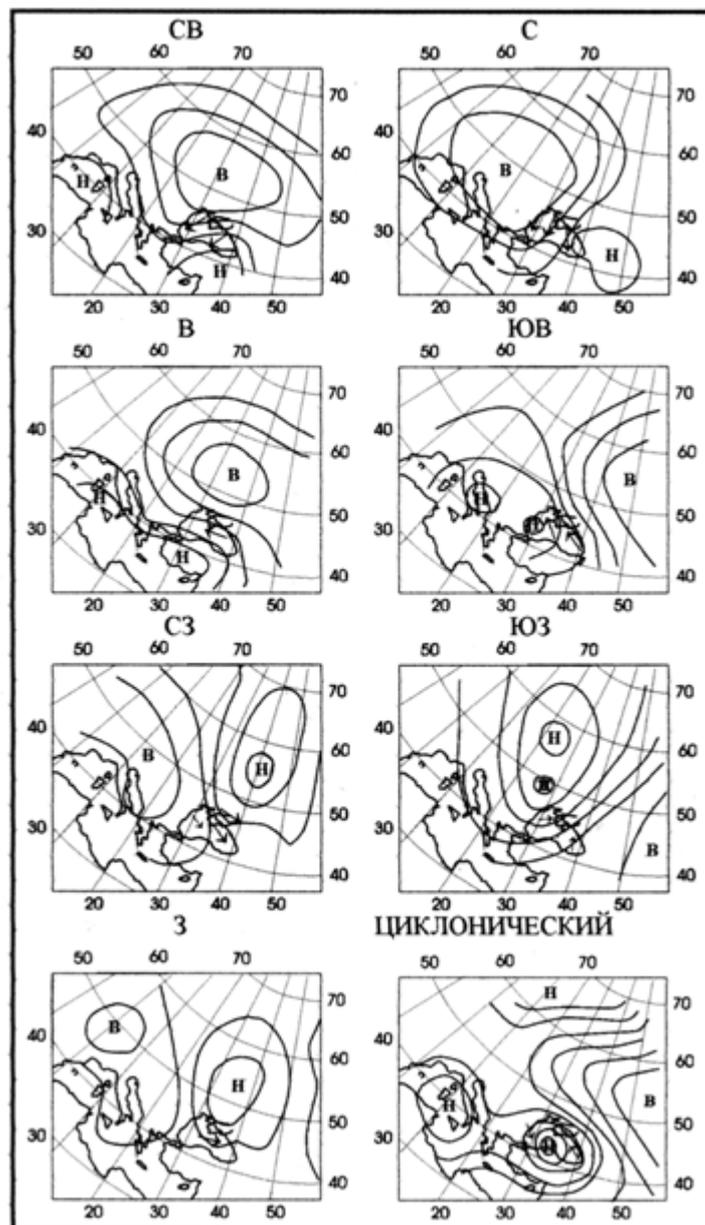


Рисунок 1.33 – Типовые поля атмосферного давления по основным типам атмосферных синоптических процессов

На климатической прогрессивной векторной диаграмме за период с 1935 по 2014 гг. (рис. 1.34) отмечаются смены преобладающих ветров СВ румбов на В-Ю-ЮВ (волны теплых периодов). Эти волны прослеживаются в следующие периоды: 1935 - 1937 гг., 1944 – 1947 гг., 1962 - 1964 гг., 1970 - 1971 гг., 1974 - 1976 гг., 1979 - 1981 гг., 1989 –1990 гг., 2004 - 2006 гг. В интервале с 1935 по 1965 гг. волны тёплых периодов по амплитуде выражены более слабо, чем в последующие годы. С 1965 по 1980 гг. высокой была повторяемость ветров В румбов. Максимальная амплитуда тёплой волны отмечалась в период с 2004 по 2006 гг., когда преобладали ветры Ю-В-ЮВ румбов. В 2004 г. высокой была повторяемость ветров Ю румбов, в 2005 г. – В, в 2006 г. – В и Ю. На климатическом масштабе времени можно видеть ~ 22-летние колебания направления ветра в теплые периоды (1943 - 1944 гг., 1960 - 1962 гг., 1980 - 1983 гг., 2003 - 2006 гг.), а также – 10-летние и 5-летние циклы. В период с 2007 по 2014 гг. в теплые и аномально теплые годы преобладали ветры СВ румбов. Такое изменение ветрового режима связано с изменением динамики крупномасштабных барических структур: ослаблением Сибирского антициклона, усилением Азорского антициклона и очень сильным развитием к северу над восточной европейской частью России циклонической атмосферной циркуляции с юга - юго-востока.

Самоподобные циклические смены СВ ветра на ЮВ и обратно на прогрессивных векторных диаграммах отмечаются как на климатическом, так и на годовом, сезонном и меньших временных масштабах. По годовым диаграммам ветра отмечаются периоды продолжительности ветрового воздействия ветров ЮВ и СВ румбов в течение нескольких месяцев. На всех диаграммах можно видеть высокую повторяемость ЮВ ветров с конца зимы почти до середины лета и СВ ветров - с августа по ноябрь. В эти периоды следует ожидать максимального воздействия ветров этих румбов на формирование структуры и циркуляции вод в прибрежной зоне.

Наибольшие различия на годовых диаграммах отмечаются в начале и в конце рассматриваемых годов. Эти различия отмечаются не только между АТ и Т годами (2010, 2014 гг., 2013 г.) и (УХ 2011 и Т 2012 гг., при Х зиме), но и в годы с одинаковыми температурными характеристиками (АТ 2010 и 2014 гг.). Наиболее сильно отличается от других диаграмма 2013 г., в котором с июля по декабрь максимально высокой была повторяемость ветров С румбов (см. рис. 1.33).

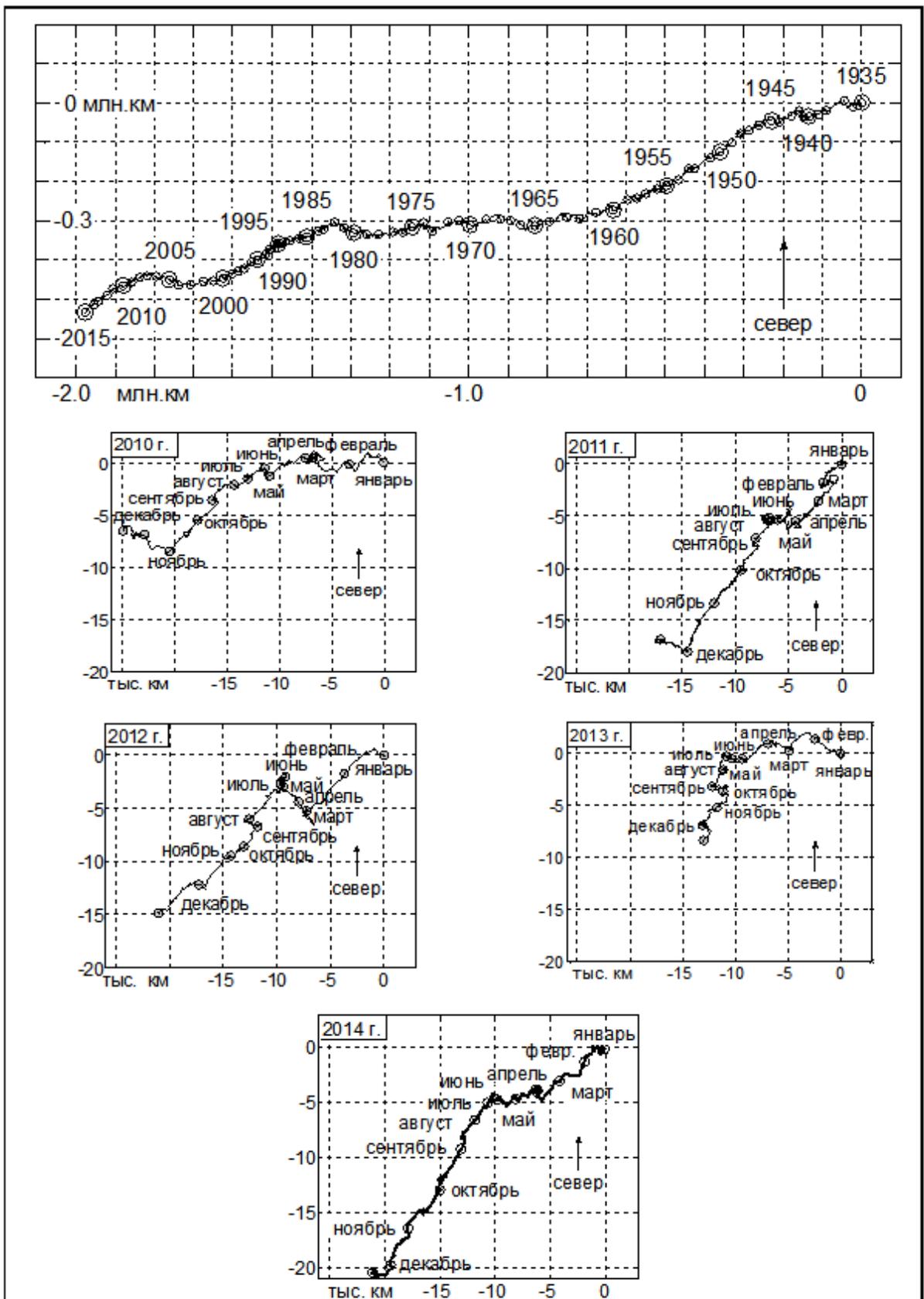


Рисунок 1.34 – Климатическая и годовые прогрессивные векторные диаграммы ветра за периоды 1935-2014 гг. и 2010 – 2014 гг.

Повторяемость ветров основных румбов по месяцам за период 2010 - 2014 гг. представлена в таблице 1.2. В таблицу также включены данные за январь - апрель 2015 г. Максимальная месячная повторяемость ветров основных румбов по годам и максимальная годовая повторяемость ветров за весь период 2010 - 2014 гг. представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.2 – Повторяемость ветров основных румбов по месяцам (%) и характеристики ветрового режима за период 2010 - 2015 гг.

2010 г													
месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	год
С	11.3	4.5	9.3	14.6	4.8	6.7	8.5	7.3	9.2	16.1	10.0	12.1	9.6
СВ	31.5	24.1	21.8	29.2	18.1	27.1	24.2	29.4	36.7	37.5	29.2	21.0	27.5
В	24.2	26.3	19.0	17.5	10.9	18.3	14.5	18.1	13.3	12.1	15.8	26.2	18.0
ЮВ	11.7	20.1	7.7	14.2	20.6	12.1	12.9	10.9	5.8	8.5	18.8	12.1	12.9
Ю	7.3	6.3	16.5	12.1	14.1	10.8	12.9	12.1	9.2	4.0	13.8	9.7	10.8
ЮЗ	9.3	7.6	10.9	5.8	11.3	7.5	6.0	4.8	5.8	6.5	5.0	4.8	7.1
З	2.8	8.5	9.3	5.0	16.5	15.4	19.4	12.9	17.5	9.7	6.3	5.2	10.7
СЗ	2.0	2.7	5.6	1.7	3.6	2.1	1.6	4.4	2.5	5.6	1.3	8.9	3.5
Σс-Σю	16.5	-2.7	1.6	13.4	-19.5	5.5	2.5	13.3	27.6	40.3	2.9	15.3	9.7
Более 12 м/с	13.3	18.8	11.7	11.2	2.4	4.6	3.2	5.2	10.4	9.3	8.3	9.5	9.0
V _{макс}	19	21	20	19	16	18	15	19	18	17	22	19	22
2011 г.													
месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	год
С	17.7	18.8	19.0	6.7	9.7	11.3	5.2	10.9	20.0	14.1	18.3	9.3	13.4
СВ	35.1	32.1	26.2	31.3	15.7	14.6	15.7	32.3	42.5	41.9	46.3	16.9	29.1
В	15.3	8.9	10.1	7.9	10.5	18.3	11.7	11.7	7.9	14.9	5.8	28.6	12.7
ЮВ	7.3	5.4	12.9	14.6	17.3	14.2	14.5	8.1	4.2	4.8	2.5	22.6	10.8
Ю	4.8	3.1	6.0	10.8	13.7	9.6	15.7	5.6	3.8	2.8	1.3	4.8	6.9
ЮЗ	4.8	5.8	4.4	16.3	6.9	10.0	9.3	8.1	5.0	4.8	3.8	6.0	7.1
З	6.0	12.9	14.9	12.1	23.0	16.7	24.2	19.8	11.7	10.5	10.0	5.6	14.0
СЗ	8.9	12.9	6.5	0.4	3.2	5.4	3.6	3.6	5	6.0	12.1	6.0	6.1
Σс-Σю	44.8	49.6	28.2	-3.4	-9.3	-2.5	-14.9	25	54.6	49.6	69.2	-1.2	23.9
Более 12 м/с	1.2	20.1	16.5	11.7	4.8	0.0	0.8	9.7	7.1	14.5	20.8	5.6	9.4
V _{макс}	16	24	22	24	17	11	14	20	19	19	27	14	27
2012 г.													
месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	год
С	9.7	13.8	14.1	5	4.0	17.9	12.9	14.9	9.6	11.3	17.5	17.3	12.3
СВ	28.6	42.2	13.3	12.9	11.3	16.3	36.3	21.0	37.1	35.9	41.3	39.1	27.9
В	25.4	12.5	10.1	19.6	10.1	10.0	14.1	10.1	7.9	17.3	12.5	19.4	14.1
ЮВ	13.3	10.3	20.6	27.1	17.7	12.1	8.1	6.5	9.6	9.7	10.8	11.7	13.1
Ю	5.2	3.9	7.7	20.0	14.5	11.3	6.9	4.4	6.3	3.2	1.3	0.4	7.1
ЮЗ	3.6	3.4	4.0	6.7	10.5	4.2	4.4	10.1	9.2	3.6	1.3	1.6	5.2
З	6.0	9.1	12.5	5.4	27.0	19.6	14.5	26.2	14.2	12.9	6.7	3.2	13.1
СЗ	8.1	4.7	17.7	3.3	4.8	8.8	2.8	6.9	6.3	6.0	8.8	7.3	7.1
Σс-Σю	24.2	43.1	12.9	-32.5	-22.6	15.4	32.6	31.9	27.9	36.7	54.2	50.0	22.8

Более 12 м/с	16.1	17.2	14.1	3.8	0	0	16.1	2.4	5.0	0.8	8.3	5.6	7.4
Vмакс	26	39	17	19	11	11	19	14	17	14	26	18	39

2013 г													
месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	год
С	10.9	17.9	7.7	8.8	7.3	10	20.6	18.1	16.7	20.6	20	23.4	15.1
СВ	13.7	27.2	9.7	28.8	19.8	14.6	16.5	26.2	25.0	26.2	28.8	19.0	21.2
В	23.4	21.9	28.2	17.9	14.5	15.4	11.3	10.1	3.3	10.9	19.6	10.5	15.5
ЮВ	24.2	15.2	23.0	17.5	19.4	19.6	12.9	16.1	7.9	15.3	10.4	10.1	16.0
Ю	4.8	1.3	2.0	5.8	8.9	8.3	4.4	4.0	2.1	0.8	1.3	3.6	4.0
ЮЗ	7.7	4.5	7.7	7.1	10.1	12.5	18.1	12.1	18.3	10.9	2.9	10.9	10.3
З	6.9	5.4	9.3	8.8	16.5	11.7	8.9	9.3	17.1	11.3	7.1	5.6	9.8
СЗ	8.5	6.7	12.5	5.4	3.6	7.9	7.3	4.0	9.6	4.0	10.0	16.9	8.0
Σс-Σю	-3.6	30.8	-2.8	12.5	-7.7	-7.9	8.9	16.1	23.0	23.8	44.2	34.7	14.3
Более 12 м/с	19.4	6.2	9.3	8.8	3.6	1.2	2.8	4.4	10.4	2.4	2.9	10.5	6.8
Vмакс	21	18	21	28	18	15	13	17	16	17	19	22	28
2014 г.													
месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	год
С	14.5	23.7	15.7	15.4	10.1	10.8	20.6	21.4	19.6	21.8	23.8	12.9	16.7
СВ	28.2	21.4	18.1	20.0	16.1	18.3	16.5	23.0	39.2	39.1	39.6	24.2	26.6
В	14.5	22.3	18.5	14.2	25.8	13.8	11.3	6.9	8.3	7.3	8.3	22.6	14.3
ЮВ	15.7	15.6	22.2	26.7	24.6	21.3	12.9	11.7	7.9	13.3	5.4	13.3	15.9
Ю	0.0	1.3	2.4	5.4	8.9	3.8	4.4	5.6	0.8	2.0	2.1	0.8	3.2
ЮЗ	8.1	7.1	10.1	8.3	7.7	18.3	18.1	16.1	9.6	4.8	3.3	10.5	10.1
З	8.5	3.1	6.9	7.9	6.0	10.0	8.9	10.5	12.1	6.5	4.6	8.1	7.8
СЗ	10.5	5.4	6.0	2.1	0.8	3.8	7.3	4.8	2.5	5.2	12.9	7.7	5.4
Σс-Σю	29.4	26.3	5.2	-2.9	-14.1	-10.4	8.9	15.7	42.9	46.0	65.4	20.2	19.5
Более 12 м/с	8.1	6.25	16.9	5.8	3.2	4.6	2.8	12.5	19.6	14.1	9.2	16.1	10.2
Vмакс	17	19	31	16	17	16	22	21	22	25	30	22	31
2015 г													
месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	год
С	19.0	25.0	12.9	12.1									
СВ	16.9	33.0	29.8	15.0									
В	21.8	13.4	16.5	17.1									
ЮВ	19.0	15.2	14.9	25.0									
Ю	2.0	1.3	3.2	3.3									
ЮЗ	8.5	4.5	9.7	12.1									
З	6.5	4.9	8.5	10.4									
СЗ	6.5	2.7	4.4	5.0									
Σс-Σю	12.9	39.7	19.4	-8.3									
Более 12 м/с	18.5	21.9	15.7	13.8									
Vмакс	24	29	29	31									

Примечание. Жирным шрифтом выделены максимальные месячные повторяемости ветров отдельных основных румбов и максимальные характеристики ветрового режима.

Таблица 1.3 – Максимальная месячная повторяемость ветров основных румбов по годам и максимальная годовая повторяемость ветров за весь период 2010 - 2014 гг.(%)

годы румб	2010	2011	2012	2013	2014	макс. (год) 2010-2014гг.
С	16.1 (октябрь)	20.0 (сентябрь)	17.9 (июнь)	20.6 (июль)	23.8 (ноябрь)	16.7 (2014)
СВ	37.5 (октябрь)	46.3 (ноябрь)	42.2 (февраль)	28.8 (апрель)	39.6 (ноябрь)	29.1 (2011)
В	26.3(февраль),	28.6 (декабрь)	25.4 (январь)	28.2 (март)	25.8.(май)	18.0 (2010)
ЮВ	20.6 (май)	22.6 (декабрь)	27.4 (апрель)	24.2 (январь)	26.7 (апрель)	16.0 (2013)
Ю	16.5 (март)	15.7 (июль)	20.0 (апрель)	8.9 (май)	8.9 (май)	10.8 (2010)
ЮЗ	11.3 (май)	16.3 (апрель)	10.5 (май)	18.3 (сентябрь)	18.3 (июнь)	10.3 (2013)
З	19.4 (июль)	24.2 (июль)	27.0 (май)	7.1 (сентябрь)	12.1 (сентябрь)	14.0 (2011)
СЗ	8.9 (декабрь)	12.9 (февраль)	17.7 (март)	16.9 (декабрь)	12.9 (ноябрь)	8.0 (2013)

Примеч. Максимальные месячная и годовая повторяемости ветров основных румбов за весь период 2010-2014 гг. отмечены жирным шрифтом.

За период 2010-2014 гг. наиболее заметные изменения ветрового режима произошли в Т 2013 г. и АТ 2014 г. (рис. 1.35). Заметно увеличились повторяемости С и ЮЗ ветров, уменьшилась повторяемость Ю ветров и очень значительно уменьшилась повторяемость З ветров. Повторяемость ветров СВ румбов была наиболее высокой в 2010 – 2012 гг. В 2013 г. повторяемость ветров СВ румбов уменьшилась и значительно увеличилась только во второй половине 2014 г. В целом, за весь период повторяемость ветров СВ румбов была максимальной. Повторяемость ЮВ ветров была высокой, начиная с конца зимы, в течение нескольких месяцев, как в АТ и Т (2010, 2014, 2013 гг.), так и в УХ 2011 г.(при УХ зиме) и Т 2012 г. (при Х зиме) (табл. 1.2).

Анализ рисунка 3 показывает, что характеристики ветрового режима в отдельные годы, могут не соответствовать их температурным градациям. Так, с июля Т 2013 г. и в АТ 2014 г. сильно увеличилась повторяемость ветров С румбов, несмотря на то, что эти годы были Т и АТ. К тому же, в эти годы значительно снизилась повторяемость Ю ветров. Повторяемость ветров З румбов была высокой в АТ 2010 г., УХ 2011 г. и Т 2012 г. (при Х зиме), но в Т 2013 и АТ 2014 гг. повторяемость ветров З румбов сильно уменьшилась. Эти различия ветрового режима в отдельные годы можно объяснить разномасштабной изменчивостью динамики атмосферных синоптических процессов (рис. 1.33).

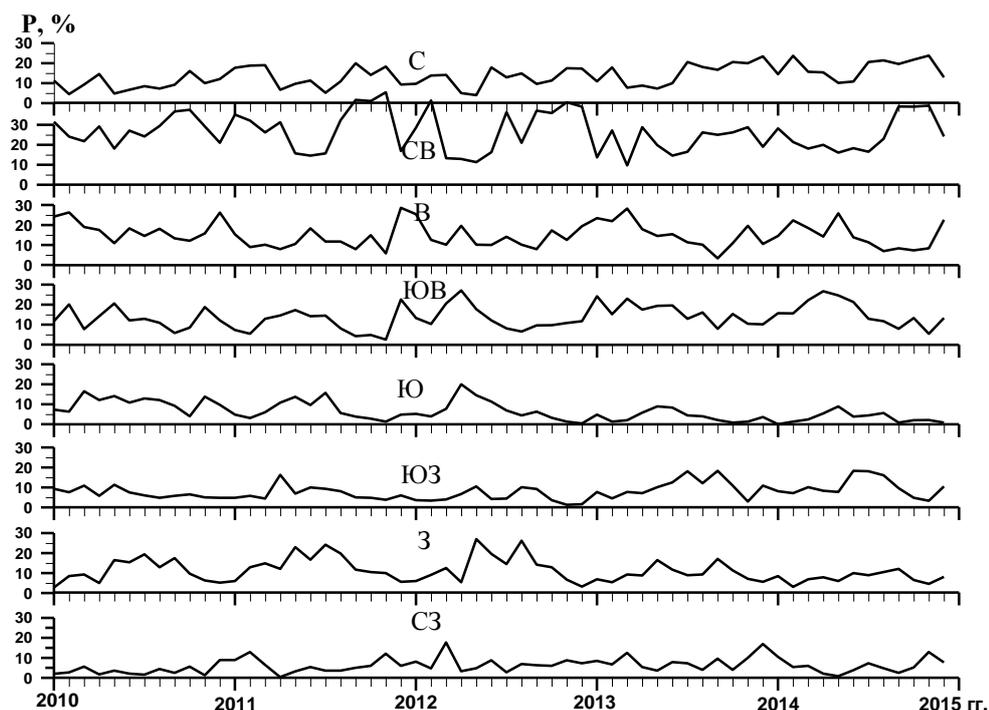


Рисунок 1.35 – Повторяемость ветров основных румбов за период 2010 - 2014 гг.

1.2.2 Оценки корреляции динамических и термических факторов

Сложная динамика взаимодействия барических полей с разными свойствами воздушных масс является причиной того, что характеристики ветрового режима не всегда совпадают с температурными градациями отдельных годов, сезонов и месяцев. В ряде случаев на акваторию моря могут приходить и отдельные локальные вихри с очень контрастными температурами и влажностью воздушных масс, вызывающие катастрофические события (катастрофическое наводнение в июле 2012 г.). Характеристики месячной температуры воздуха за период 2010 - 2015 гг. представлены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Среднемесячная температура воздуха за период 2010 - 2015 гг. и разность среднемесячных и среднемноголетних температур за период 1935 - 2014 гг.

месяц	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
год	Температура воздуха											
2010	6.3	8.6	7.7	12.3	17.4	23.7	26.2	28.0	22.8	14.2	14.5	11.2
2011	5.1	2.8	6.6	10.6	15.8	21.5	25.2	24.3	20.8	13.8	5.3	8.7
2012	4.1	0.3	4.0	12.8	18.5	23.7	26.2	25.2	22.2	19.1	12.3	7.4
2013	7.0	8.6	8.3	12.5	19.7	22.0	24.4	25.4	18.2	13.6	12.2	5.2
2014	6.6	7.2	9.6	12.5	18.2	21.7	25.6	26.8	21.1	14.1	10.0	9.7
2015	6.0	6.6	9.1	10.2								
ср.многог.	4.4	4.5	6.6	11.3	16.0	20.6	24.0	24.2	19.8	14.6	10.1	6.6
Разность месячных и среднемноголетних температур воздуха												

2010	1.9	4.1	1.1	1.0	1.4	3.1	2.2	3.8	3.0	-0.4	4.4	4.6
2011	0.7	-1.7	0	-0.7	-0.2	0.9	1.2	0.1	1.0	-0.8	-4.8	2.1
2012	-0.3	-4.2	-2.6	1.5	2.5	3.1	2.2	1	2.4	4.5	2.2	0.8
2013	2.6	4.1	1.7	1.2	3.7	1.4	0.4	1.2	-1.6	-1	2.1	-1.4
2014	2.2	2.7	3.0	1.2	2.2	1.1	1.6	2.6	1.3	-0.5	-0.1	3.1
2015	1.6	2.1	2.5	-1.1								

Оценки разности среднемесячных и среднемноголетних температур воздуха при разных ветровых режимах показали, что при ветрах СВ и С румбов в разные сезоны года могут приходиться воздушные массы как с низкими, так и высокими температурами воздушных масс, вследствие чего температурные характеристики отдельных месяцев и сезонов могут не совпадать с температурными градиентами года в целом. Как видно из таблицы 1.4, наиболее сильные понижения среднемесячных температур воздуха относительно среднемноголетних значений (более, чем на 4 °С) отмечались в ноябре УХ 2011 г. и в феврале Т 2012 г. (при Х зиме), при очень высокой повторяемости СВ ветров и высокой повторяемости С ветров. Температуры воздуха значительно выше нормы были: в декабре и ноябре АТ 2010 г. (при преобладающих В ветрах и высокой повторяемости ЮВ ветров); в октябре Т 2012 г. (при преобладающих СВ ветрах); в феврале и мае Т 2013 г. (при преобладающих С, В, и СВ, ЮВ ветрах). Следует отметить, что, несмотря на то, что зима 2012 г. была холодной, с апреля по декабрь 2012 г. температура воздуха превышала среднемноголетнюю температуру этих месяцев. В этот год, с июля по декабрь преобладали СВ ветры, которые во вторую половину года приносили теплые и сухие воздушные массы со стороны Казахстана. В АТ 2014 г. только в октябре и ноябре ежемесячные температуры воздуха были незначительно ниже многолетних (при высокой повторяемости СВ и С ветров) (табл. 1.2). В 2015 г., несмотря на то, что зимой были очень высокими повторяемость ветров С и СВ румбов, повторяемость высоких скоростей (более 12 м/с) и положительная разность всех суммарных северных и южных ветров (табл. 1.2), месячные температуры воздуха превышали среднемноголетние. В апреле преобладали ЮВ ветры, но повысилась повторяемость З и СЗ ветров. Температура воздуха в апреле была ниже среднемноголетней на 1.1 °С.

1.2.3 Влияние ветрового режима на формирование структуры и циркуляции вод прибрежной зоны

По годовым диаграммам ветра и рисункам временной изменчивости ветра, температуры воздуха и воды по месяцам (по срокам наблюдений через 3 часа в сутки) выделены периоды продолжительного ветрового воздействия ветров отдельных румбов в

течение нескольких месяцев (рис. 1.35, СВ и ЮВ ветры) и в течение 1-2-х декад месяца (рис. 1.36, ветры С, СВ, СЗ, ЮВ, ЮЗ и З румбов). Эти рисунки представляют интерес для анализа особенностей циркуляции вод по экспериментальным данным, в прибрежной зоне в периоды продолжительного ветрового воздействия отдельных основных румбов. Максимальная повторяемость СВ ветров была в ноябре 2011 г., С – ноябре 2014 г., В - декабре 2011 г., ЮВ – апреле 2012 г., Ю - апреле 2012 г., ЮЗ - сентябре 2013 г., З – мае 2012 г., СЗ – марте 2012 г. (табл. 1.3). На представленных рисунках приведены также температуры воздуха и воды. Как видно на рисунке 1.36, осенью при высокой повторяемости ветров С, СВ и СЗ румбов среднемесячные температуры воздуха и воды были значительно ниже среднемноголетних, при ветрах ЮЗ румбов - в пределах или ниже среднемноголетних. Весной при преобладающих ветрах ЮВ румбов температуры воздуха и воды были выше среднемноголетних, при сменах ЮВ ветров на СВ и обратно – в пределах среднемноголетних, при ветрах З румбов – в пределах или выше среднемноголетних. Как уже отмечалось ранее, следует при этом отметить, что корреляция направления ветров и температуры воздуха и воды не всегда однозначна, так как преобладающими ветрами в разные сезоны года могут переноситься воздушные массы с разными температурами воздуха (см. сильное повышение температур воздуха и воды при ветрах СВ румбов 17 - 19 мая 2012 г., рис. 1.36). Наиболее сильное повышение температуры воздуха и воды при ветрах СВ румбов отмечалось в последней декаде июля 2012 г. На всех представленных рисунках также видно, что колебания температуры воды значительно ниже по амплитуде колебаний температуры воздуха.

По экспериментальным данным, полученным в прибрежной зоне за период 2010 - 2014 гг. с борта НИС «Ашамба», отмечена доминирующая роль ветров ЮВ румбов в трансформации характеристик ХПС в прибрежной зоне. Ежемесячные зондирования проводились CTD-зондом Sea Bird 19+ до глубины 200 м в точке стандартного разреза на траверзе Голубой бухты ($44^{\circ}31.203'$ с.ш. и $37^{\circ}54.260'$ в.д.). При ЮВ ветрах, высокая повторяемость которых отмечалась в течение нескольких месяцев во все годы с различными температурными градациями, усиливается общая циркуляция вод и увеличивается наклон пикноклина в сторону берега. Вследствие этого, создаются условия для усиления адвекции холодных промежуточных вод из районов их формирования в прибрежную зону моря.

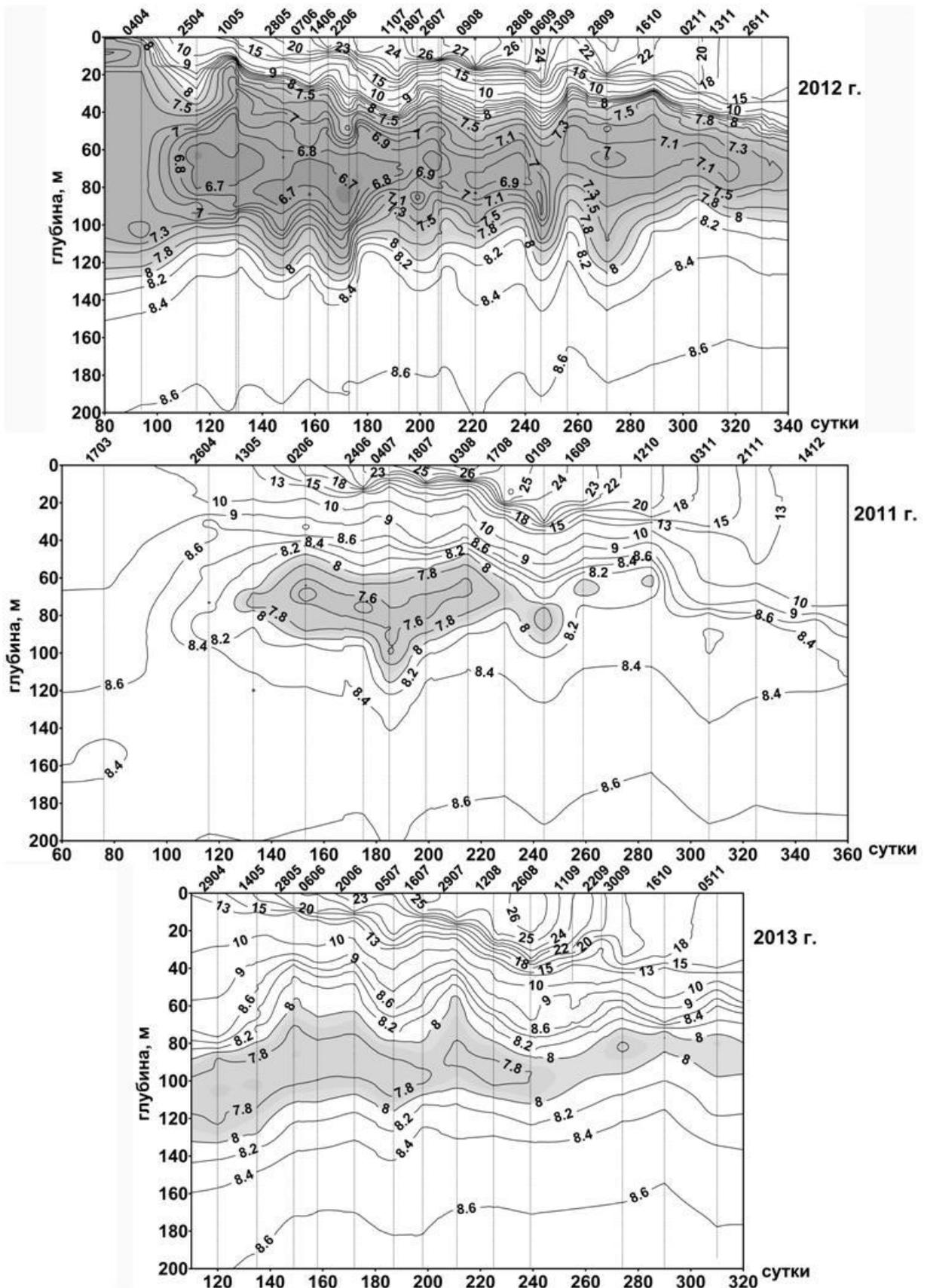


Рисунок 1.37 – Временной ход температуры воды по месяцам в Т 2012 г. (при X зиме), УХ 2011 г. (при УХ зиме) и Т 2013 г. (при Т зиме) в точке стандартного разреза (44°31.203' с.ш. и 37°54.260' в.д.). Примеч. На горизонтальных осях рисунков приведены сутки года и дата и месяц выполнения профиля.

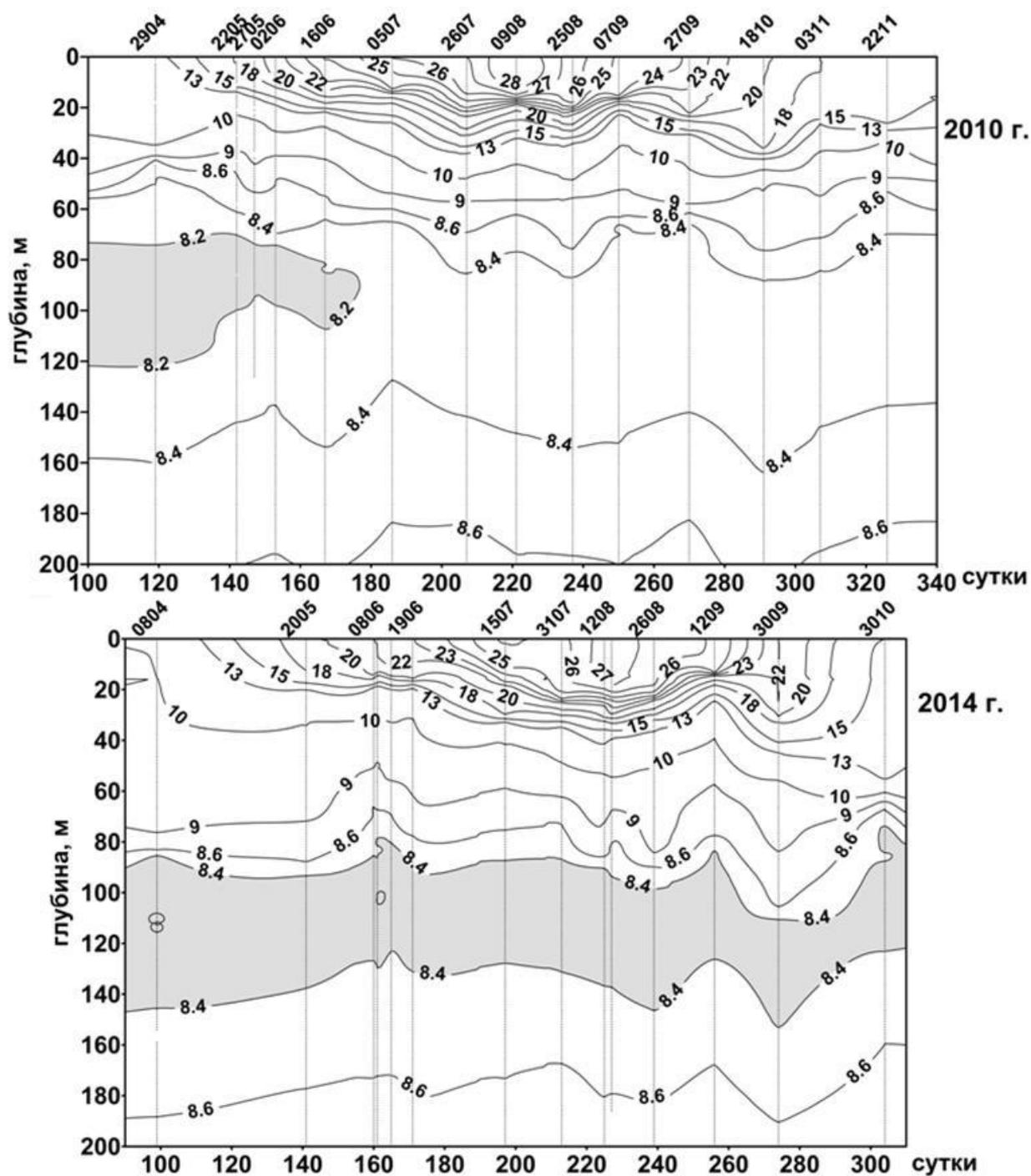


Рисунок 1.38 – Временной ход температуры воды по месяцам в АТ 2010 г. и АТ 2014 гг. (при теплых зимах) в точке стандартного разреза ($44^{\circ}31.203'$ с.ш. и $37^{\circ}54.260'$ в.д.)

1.2.4 Характеристики ветра, температуры воздуха, воды и осадков в январе-апреле 2015 г.

Сравнение ветрового режима за период январь-апрель 2015 г. и 2014 г. позволяет отметить следующее. В январе 2015 г., по сравнению с 2014 г., была более высокой повторяемость С, В и ЮВ ветров, в феврале – С и СВ, в марте - СВ и увеличилась повторяемость З ветров. В апреле была самой высокой за последние годы повторяемость

значений среднезимней температуры воздуха по выборке (январь, февраль, март) составляла 12.7%, по выборке (декабрь предыдущего года, январь, февраль) - 11.4%. В последние годы зима 2010 г. была Т, 2011 г. – УХ, 2012 г. – Х, 2013 г. – Т, 2014 г. - АТ, 2015 г. – Т.

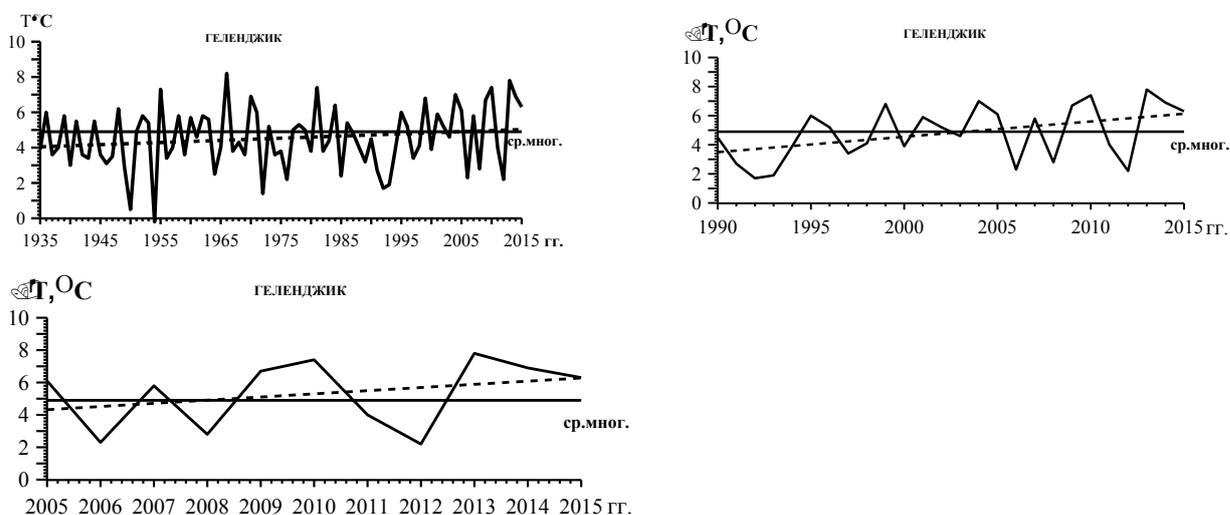


Рисунок 1.40 – Тренды среднезимней температуры воздуха (по выборке январь-февраль) за 80-ти- летний (1935 - 2015 гг.), 25-ти- летний период (1990 - 2015 гг.) и 10-ти -летний период (2005 - 2015 гг.).

Наиболее быстрое увеличение значений среднезимней температуры воздуха отмечалось в период с 1990 по 2015 гг. За период с 1935 г. по 2015 гг. температура тренда среднезимней температуры увеличилась на 1°C (с 4.1°C до 5.1°C), с 1990 по 2015 гг. - на 2.7°C (с 3.5 до 6.2 °C), а с 2005 по 2015 гг. - на 2°C (с 4.3 °C до 6.3°C).

На рис. 1.41 представлен ход среднегодовых значений температуры воздуха (сплошная кривая) и их линейный тренд (пунктирная линия) за те же три периода.

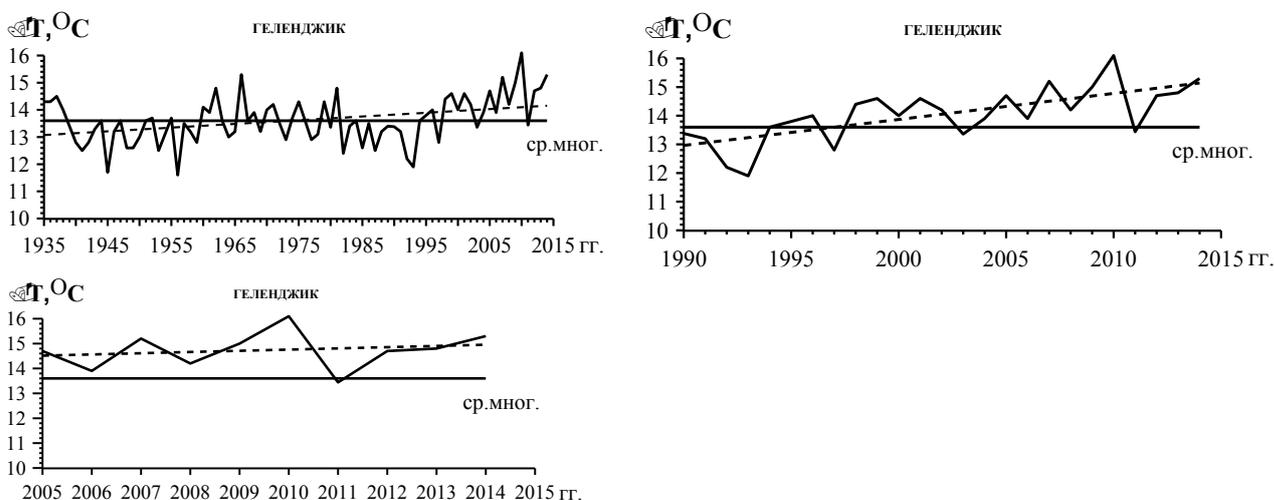


Рисунок 1.41 – Тренды среднегодовой годовой температуры воздуха за периоды: 1935 - 2014 гг., 1990 - 2014 гг., 2005 - 2014 гг.

Наибольший линейный тренд значений среднегодовой температуры воздуха также наблюдался в период с 1990 по 2014 гг.: увеличение значений составило 2.12°C (с 12.98°C до 15.1°C). В период с 1935 по 2014 гг. общее увеличение среднегодовой температуры составило 1°C (с 13.1°C до 14.1°C), в период 2005 – 2014 гг. - 0.5°C (с 14.5°C до 15°C).

Сравнение рис. 1.40 и 1.41 показывает, что в период с 2005 по 2014 гг. увеличение среднегодовой годовой температуры (рис. 1.41) было несколько меньшим, чем среднезимней за этот период (рис. 1.40). Это означает, что в теплые сезоны года сколь-нибудь значительного тренда потепления температуры в этот период не наблюдалось.

2 ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ МНОГОКАНАЛЬНЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СКАНЕРОВ SEVIRI И MODIS И ПОЛУЧЕНИЕ МАССИВА РАСЧЕТНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ МОРЯ И КОНЦЕНТРАЦИИ ХЛОРОФИЛЛА «А» НА РЕГУЛЯРНОЙ СЕТКЕ

2.1 Данные сканера SEVIRI

Одной из проблем определения температуры поверхности океана (ТПО) по спутниковым данным является учет суточного хода температуры. Его величина в приповерхностном (метровом) слое может достигать нескольких градусов и зависит от многих условий: интенсивности приходящей коротковолновой (солнечной) радиации, ветро-волнового перемешивания, толщины верхнего квазиоднородного слоя, наличия пленок поверхностно-активных веществ и некоторых других факторов. В силу этого, чисто теоретический подход к учету этого важного явления изменчивости ТПО является малопродуктивным. Вместе с тем, большая временная скважность в получении данных ТПО инфракрасных радиометров спутников NOAA, MODIS, Landsat и др. не позволяет решать задачу восстановления суточного хода ТПО эмпирическим образом. Однако появление в сравнительно недавнем прошлом с 2006 года данных инфракрасного радиометра SEVIRI дает возможность восстанавливать суточный ход ТПО. В данном разделе отчета рассматриваются методические аспекты восстановления суточного хода ТПО и улучшения качества данных путем статистической обработки восстановленных полей и приводятся примеры применения разработанной методики и статистического подхода.

Сенсор SEVIRI «Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager», установленный на геостационарном спутнике MSG-2, имеет высокую дискретность измерений (0,25 часа) и относительно высокое пространственное разрешение (4 - 6 км) для Черного моря. Данные характеристики позволяют не только более эффективно проводить их сравнение с измерениями *in situ* с целью их верификации и исследования природы ошибок спутниковых измерений, но и более эффективно использовать для изучения процессов в цикле дневного прогрева. Например, восстановленные поля температур поверхности океана по данным сенсора SEVIRI уже были использованы в ряде публикаций для изучения дневного прогрева [2–4] и для коррекции эмпирических моделей дневного прогрева [5].

Работы по улучшению точности полей ТПО, полученных сенсором SEVIRI, заключаются преимущественно в совершенствовании существующих алгоритмов восстановления последних из яркостных температур [6–8]. Однако, попыток улучшения качества данных путем статистической обработки восстановленных полей предпринято не было. Кроме того, поскольку температура, измеряемая в ИК диапазоне, формируется в

тонком слое (0.1мм) является температурой скин-слоя [9] по своей природе, необходимо учитывать скачок температуры в скин-слое для приведения спутниковых температур к температуре поверхности океана. В настоящее время это осуществляется путем добавления константы, по сути являющейся средним значением перепада температуры в скин-слое. Однако средние характеристики перепада температуры в скин-слое варьируют от одного района Мирового океана к другому и зависят преимущественно от гидрометеорологических условий. Поэтому учет изменчивости перепада температуры в скин-слое от метеорологических параметров также может быть применен для увеличения точности спутниковых полей ТПО.

Основной задачей данного этапа работ является разработка методики оценки изменчивости температуры в цикле дневного прогрева на основе данных, полученных спутниковым сенсором SEVIRI для Черноморского региона.

Использованные данные. Данные ТПО в Черном море, восстановленной по измерениям яркостных температур сенсора SEVIRI, были выбраны из набора данных «OSDPD-L2P-MSG02», предоставляемого GHRSSST (Group for High Resolution Sea Surface Temperature) [11]. Использовались данные второго уровня обработки [12]. Из этого же набора данных была получена информация о приповерхностном ветре и вероятности чистого неба («Probability of clear sky») [13].

Спутник MSG-2 (Meteosat Second Generation -2) расположен в плоскости экватора над нулевой широтой. Инструмент SEVIRI, установленный на спутнике, получает изображения Атлантического региона (включая Черное море и Балтику) в 12-ти спектральных каналах. Одиннадцать из них дают изображения полного диска с дискретностью 0,25 часа. Пространственное разрешение сенсора изменяется от 3 километров в надире до примерно 6 километров в крайних точках [14]. Пример визуализированного поля ТПМ и карта пространственного разрешения сенсора для Черноморского региона представлены на рис. 2.1.

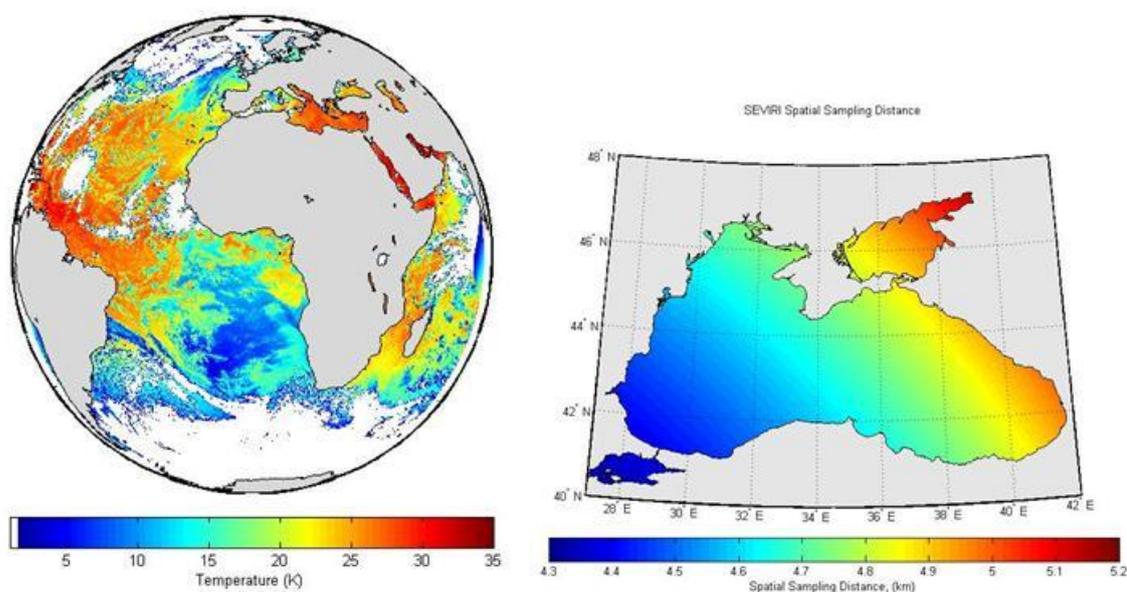


Рисунок 2.1 – Полный кадр ТПМ и карта пространственного разрешения сенсора для Черноморского региона представлены на рисунке

Методика. Как уже было отмечено, сенсор SEVIRI имеет высокую дискретность измерений, что предлагает новые возможности для использования статистических методик с целью улучшения качества спутниковых полей ТПМ. В данной работе мы применяем техники пространственного фильтрования и кубического сглаживающего сплайна для уменьшения шума спутниковых полей ТПМ. Алгоритм сглаживания заключался в следующем.

На первом этапе проводилось экранирование – удаление из дальнейшего рассмотрения точек, в которых параметр «Probability of clear sky» (вероятность чистого неба), меньше заданного значения (значение, использованное в работе – 0,9994). Далее, к каждому снимку применялась процедура пространственной медианной фильтрации типа «медиана с размером локального окна», полученного методом минимизации среднеквадратической ошибки, т.е. выбирался такой размер окна, при котором среднеквадратическое отклонение (СКО) разности температур, измеренных контактными и дистанционными методами, достигало минимума.

Полученные временные ряды были сглажены с использованием кубического сглаживающего сплайна [16]. Реализация алгоритма сплайн-сглаживания доступна в среде MatLab под названием «Csaps» и имеет один параметр, косвенно определяющий весовые коэффициенты. Подбор данного параметра, также как и размер локального окна, проводился путем минимизации среднеквадратической ошибки. Пример карты температуры, полученной таким образом, представлен на рис. 2.2.

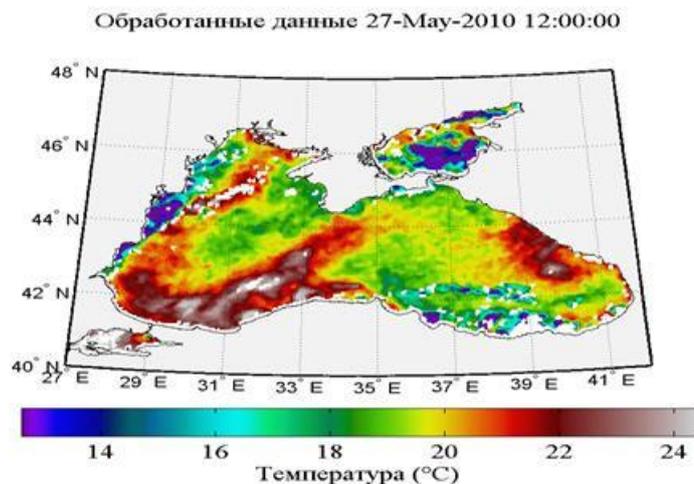


Рисунок 2.2 – Карта температуры с зонами интенсивного дневного прогрева

В общем случае изменение температуры в цикле дневного прогрева dT/dt определяется потоком тепла и глубиной перемешанного слоя и может быть оценена как:

$$dT/dt \sim Q/\rho c N \quad (2.1)$$

где Q – суммарный поток тепла через поверхность вода-воздух, ρ – плотность воды, c – теплоёмкость воды, N – глубина перемешанного слоя. Величина N зависит также от интенсивности ветрового перемешивания.

При слабых ветрах прогревается тонкий поверхностный слой, и амплитуда дневного хода может достигать величины 4-5С. Пример такого интенсивного прогрева при штилевых условиях показан на рис. 2.3.

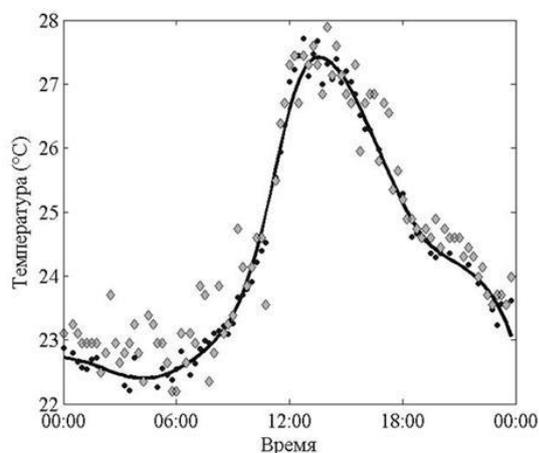


Рисунок 2.3 – Изменение температуры в течение суток для точки с координатами: (43.6 СШ; 31 ВД) 12 июня 2010 года. Ромбы – сырые данные, точки – фильтрованные и линия – сплайн интерполяция

Для безоблачных участков Черного моря были рассчитаны для разных сезонов типичные зависимости изменения температуры в суточном цикле и средние амплитуды изменчивости для каждого месяца. На рисунках 2.4-2.6 представлены графики изменчивости температуры в дневном цикле для разных сезонов и ветровых условий, соответственно пары для слабых ветров, умеренных ветров и сильных ветров.

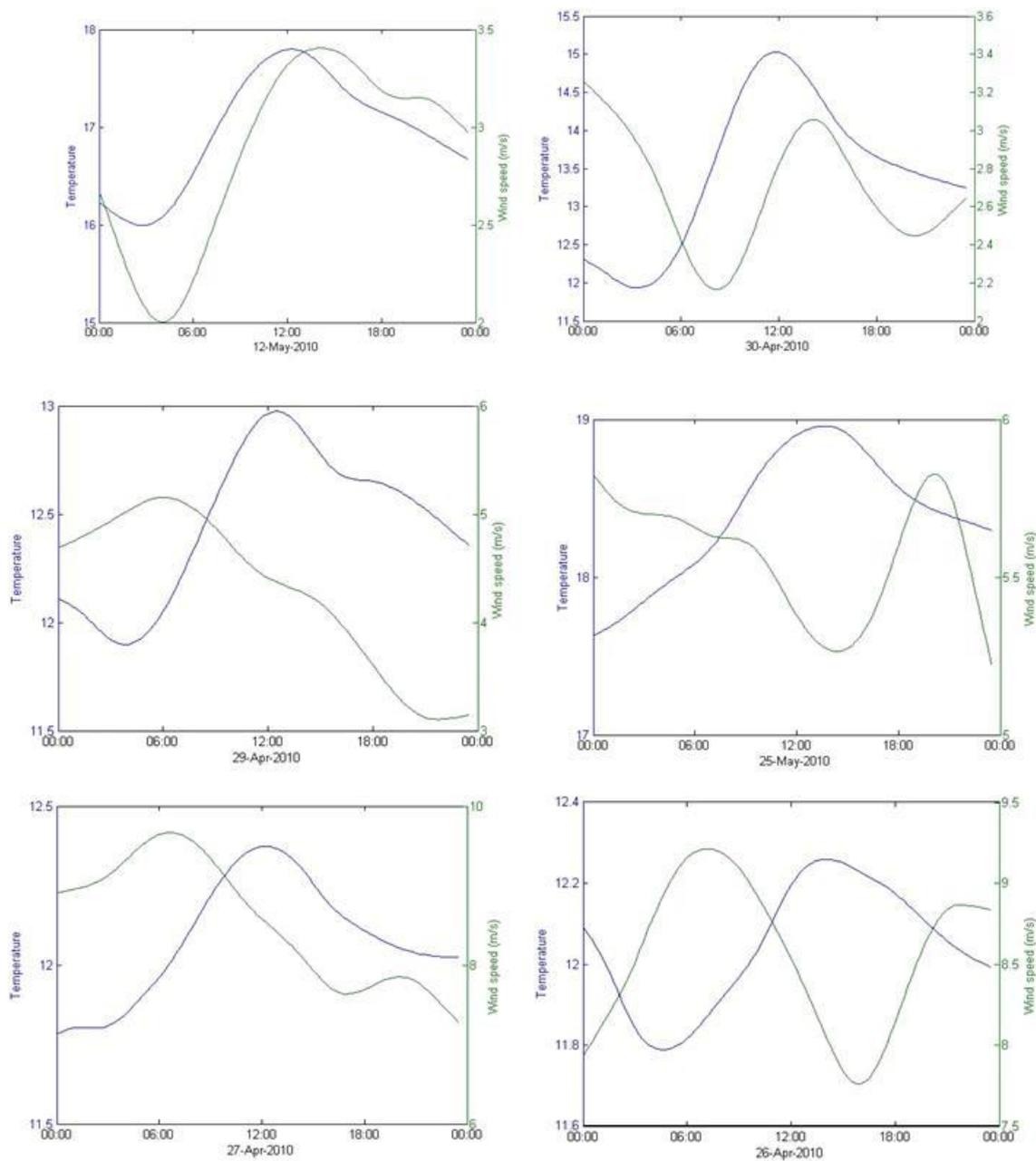


Рисунок 2.4 – Графики изменчивости температуры и скорости ветра для различных ветровых условий – весенний сезон

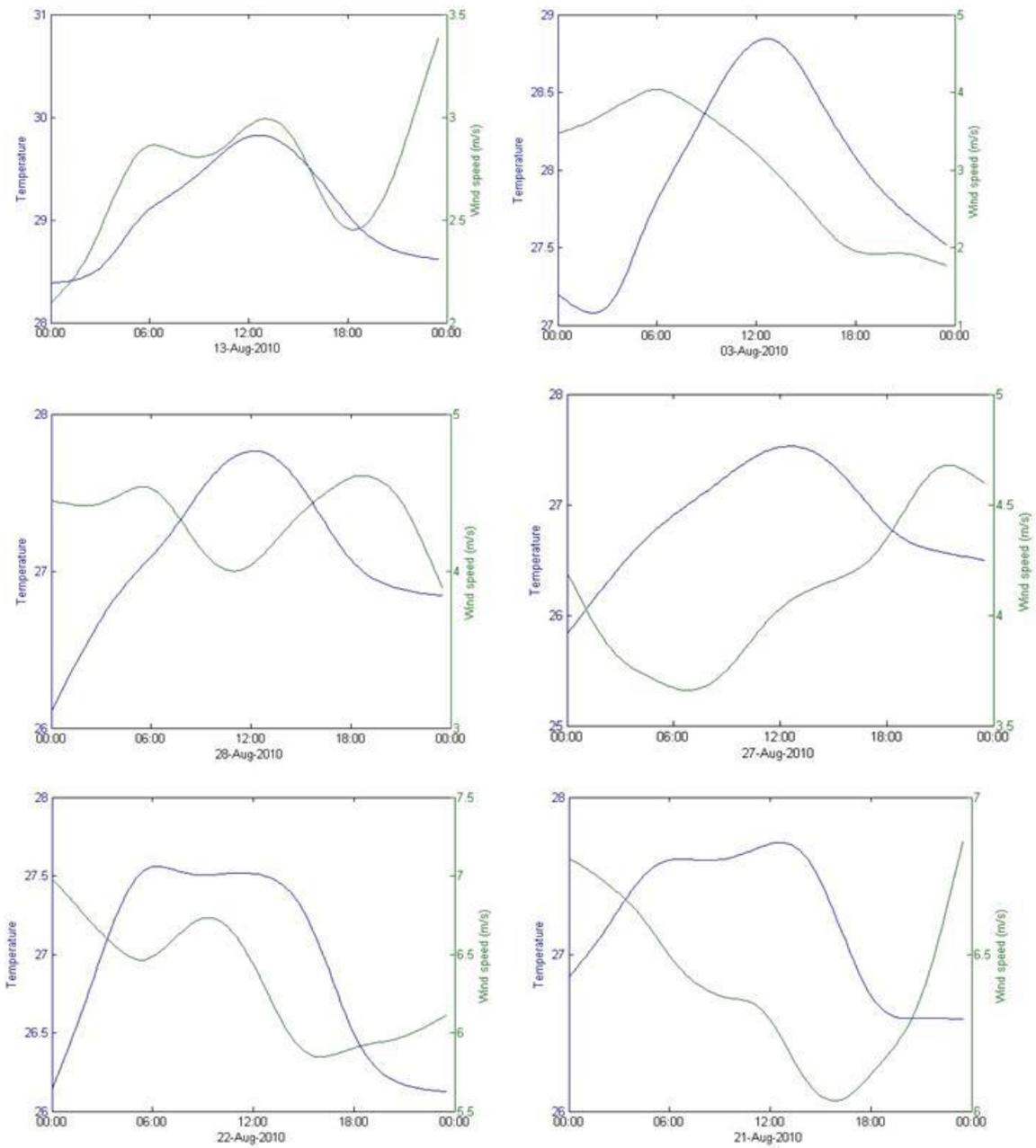


Рисунок 2.5 – Графики изменчивости температуры и скорости ветра для различных ветровых условий – летний сезон

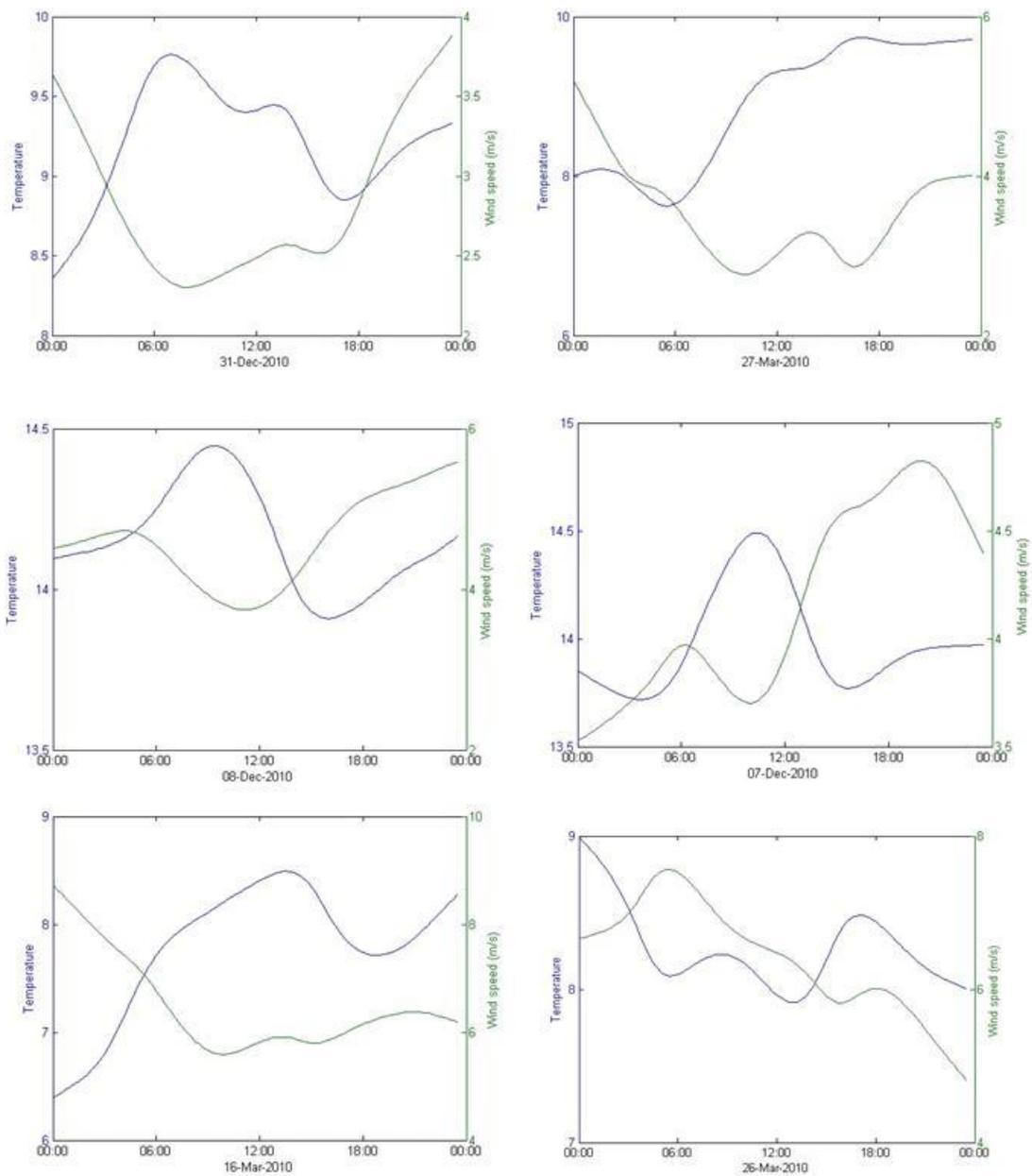


Рисунок 2.6 – Графики изменчивости температуры и скорости ветра для различных ветровых условий – зимний сезон

На рис. 2.7 представлены средние значения амплитуды суточного хода для различных месяцев года.

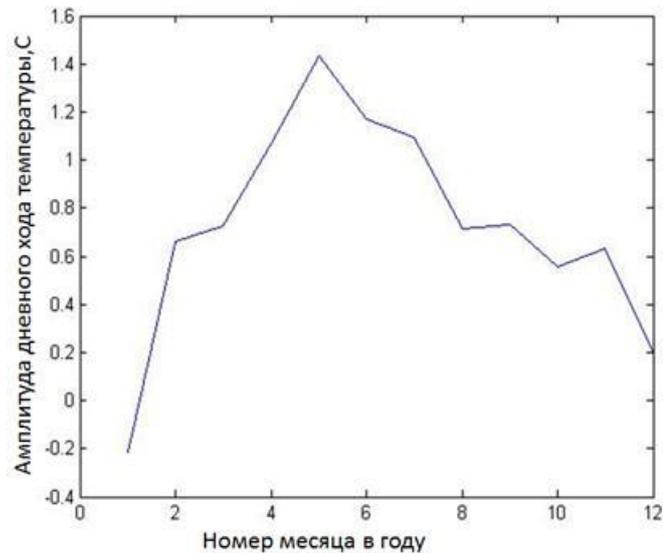


Рисунок 2.7 – Средняя амплитуда суточного изменения температуры для каждого из месяцев

Доля дней, с наличием безоблачных условий над значительной частью акватории Черного моря представлена на рис. 2.8. Очевидно, что чем больше эта доля, тем надежнее определяются параметры суточного хода ТПО.

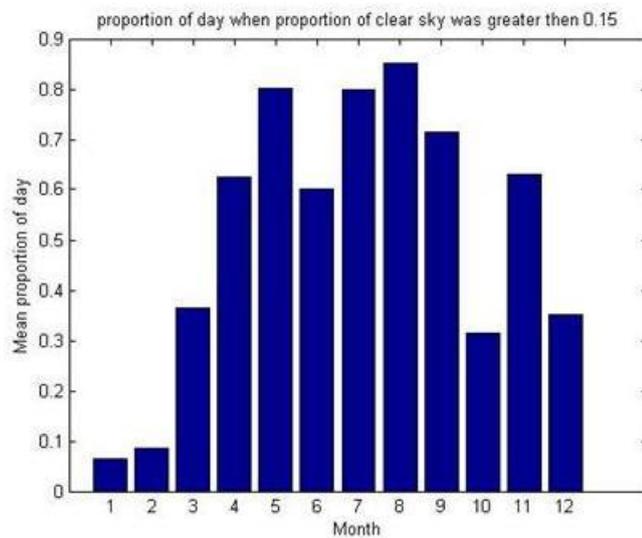


Рисунок 2.8 – Доля дней в месяце с площадью безоблачных районов моря превышающей 15 %

Ниже приведены примеры изменчивости температуры, скорости ветра и потока тепла для ряда безоблачных дней. Хорошо видно, что прогрев начинается сразу после возникновения положительных потоков тепла. При слабом ветре амплитуда дневного хода составляет 1.7-2° С (рис. 2.9 а,б), а при умеренных ветрах не превышает 1° С (рис. 2.9 в,г)

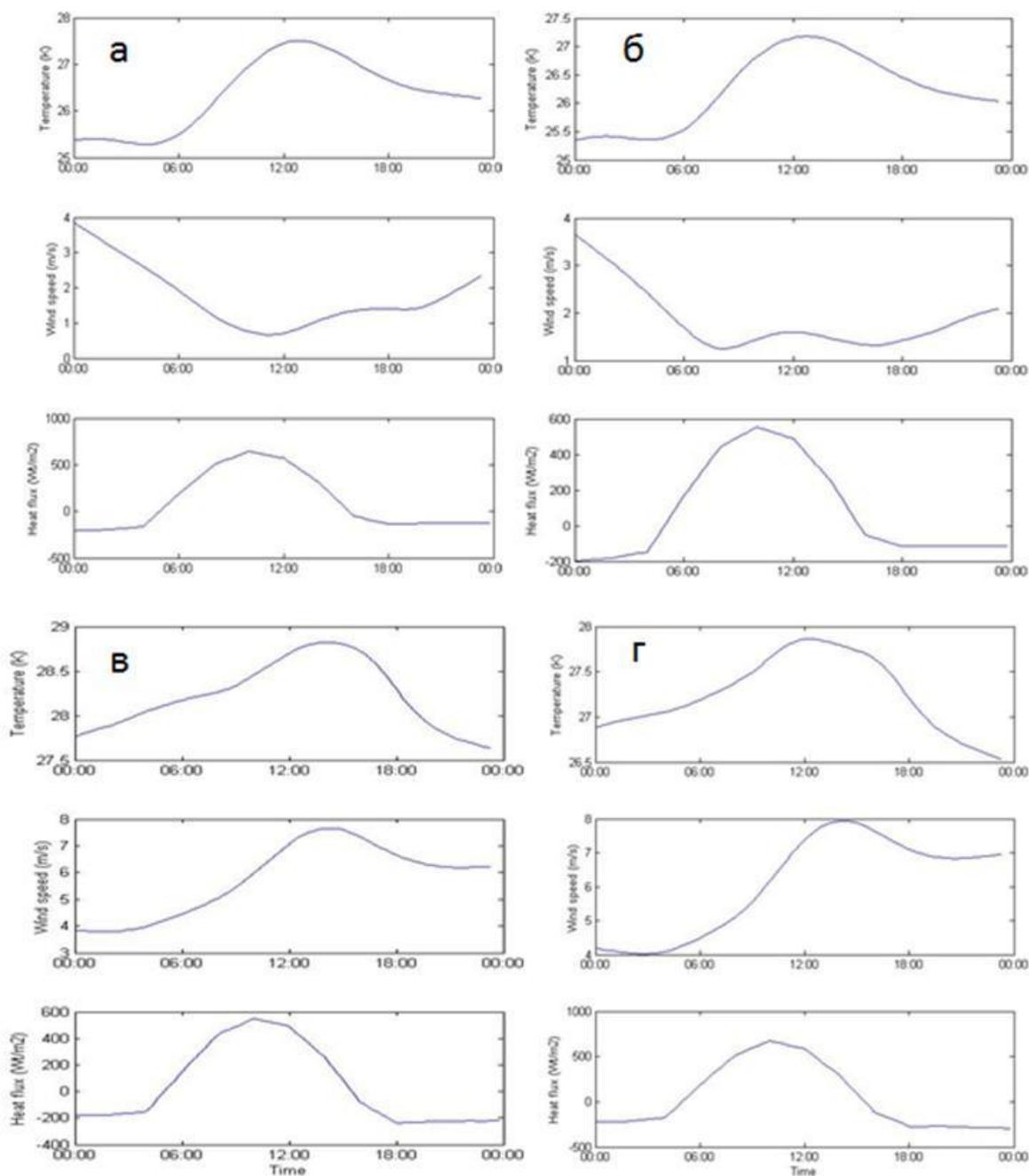


Рисунок 2.9 – Примеры изменчивости температуры, амплитуды скорости ветра и потока тепла для различных условий в летний сезон, время Гринвич (местное солнечное +2 часа)

Всего в качестве тестового массива за 2010 год было построено около 35 000 карт температуры морской поверхности на регулярной сетке с интервалом 15 минут. Все данные сохранены в виде цифровых файлов. В дальнейшем будут построены аналогичные карты для 2011-15 гг.

В первом приближении для теплого сезона амплитуда дневного хода может быть оценена в рамках эмпирических моделей типа [5] или более простых, описываемых

формулой (2.1). Учитывая, что глубина перемешанного слоя обратно пропорциональна третьей степени скорости ветра W , в первом приближении можно оценивать максимальную амплитуду изменения температуры dT следующим образом:

$$dT = K/(W+A)^3 \quad (2.2)$$

Коэффициент K зависит от интегрального потока тепла с учётом статистических характеристик облачности, а коэффициент A ограничивает стремление dT к бесконечности при очень слабых ветрах.

Ниже приведено сопоставление измеренных значений амплитуды суточного хода DT в период в тёплый период года (март-август) с рассчитанными значениями dT по формуле (2.2) с коэффициентами $K=270$ и $A=2$ (рис. 2.10).

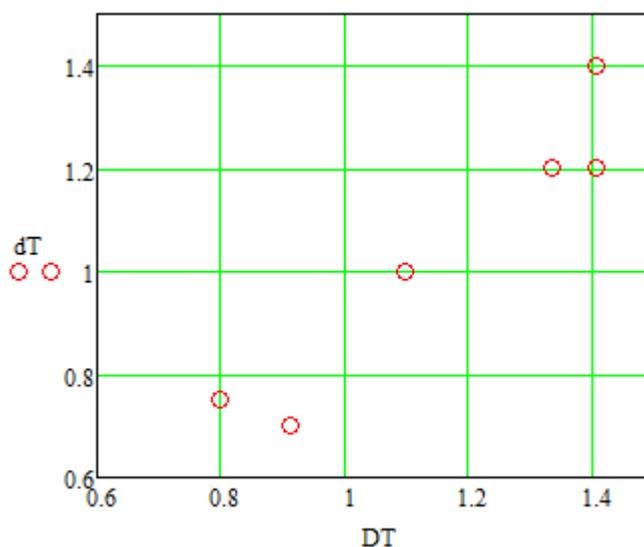


Рисунок 2.10 – График сопоставления измеренных значений амплитуды суточного хода DT в период в тёплый период года (март-август) с рассчитанными значениями dT

Полученные результаты будут в дальнейшем использованы при интерпретации и коррекции данных несинхронных натуральных и контактных измерений с учётом изменчивости в цикле дневного прогрева, а также для коррекции потоков тепла на границе океан - атмосфера в объединённых атмосферных и гидродинамических моделях.

2.2 Данные сканера MODIS.

В качестве исходных данных были выбраны два массива ежедневных данных:

- картированные с разрешением 4 км данные по концентрации хлорофилла (Level 3);
- данные полного разрешения (Level 2);

Оба массива загружались с сайта OCEANCOLOR

<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/l3>, <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/browse.pl?sen=am>.

Соответственно для Level 3 и Level 2 данных в HDF формате из данных Level 3 вырезался район Черного моря, а данные Level 2 картировались с разрешением 1.1 км. Примеры карт концентрации хлорофилла «а» приведены ниже на рисунках 11 и 12.

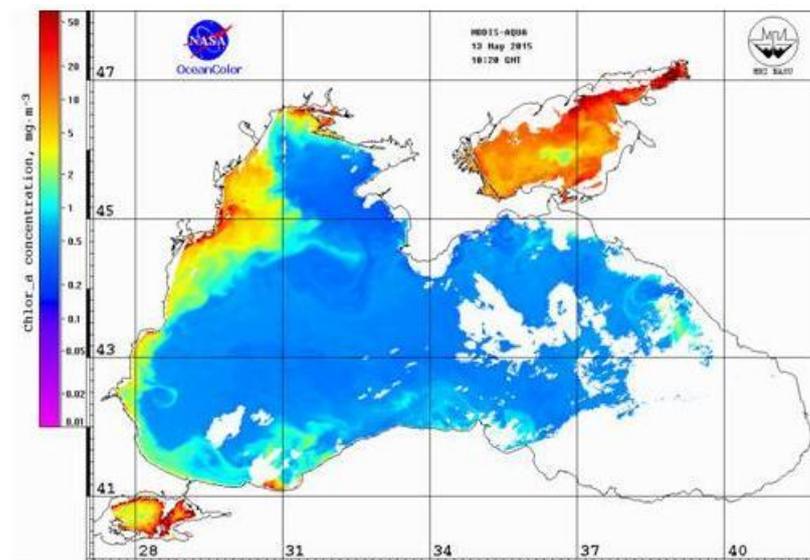


Рисунок 2.11 – Карта концентрации хлорофилла с пространственным разрешением 1.1 км полученная на основе данных Level 2

Все данные с разрешением 1.1 км доступны на сайте: <http://dvs.net.ru/mp/data/main.shtml> в графическом формате и в виде Geotiff файлов (описание формата можно найти на сайте <http://trac.osgeo.org/geotiff/>). На основе этих данных при сопоставлении с контактными наблюдениями проведена разработка регионального алгоритма восстановления концентрации хлорофилла «а».

Эти данные были использованы для построения непрерывных рядов карт с использованием пространственно – временной фильтрации и интерполяции. Как результат, получен массив карт без пропусков, вызванных наличием облачности:

– ежедневные карты концентрации хлорофилла с разрешением 1.1 км с 2003 года (с 2005 доступны на сайте <http://dvs.net.ru/mp/data/main.shtml>), форматы gif, Geotiff;

- ежедневные карты концентрации хлорофилла «а» с разрешением 4 км с 2003 года в формате mat;

- ежедневные карты концентрации хлорофилла «а» без «дырочек» с 2003 по 2014 годы.

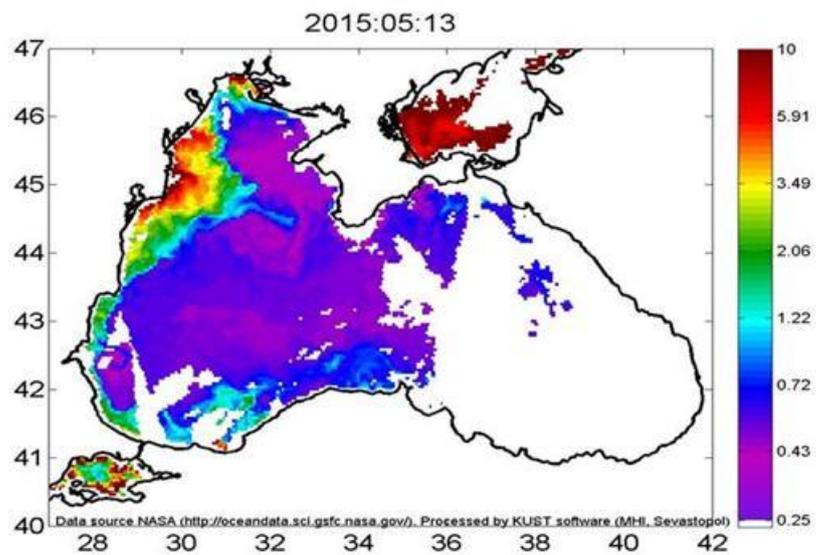


Рисунок 2.12 – Карта концентрации хлорофилла «а», построенная на основе данных Level 3 с пространственным разрешением 4 км

3 АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ КЛЮЧЕВЫХ ПАРАМЕТРОВ ВОДНОЙ СРЕДЫ НА АКВАТОРИИ ПОДСПУТНИКОВОГО ПОЛИГОНА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Описание подспутникового полигона ИО РАН

Комплексный мониторинг состояния прибрежной морской экосистемы на судовом разрезе является одним из важных элементов программы черноморских исследований ИО РАН и проводится в ЮО ИО РАН с 2010 г., преимущественно в теплый сезон года (апрель-ноябрь). Судовой разрез имеет общую протяженность в 9 миль и включает в себя 7 станций (рис. 3.1). Отбор проб осуществляется с борта МНИС «Ашамба». На всех станциях разреза выполняются STD-зондирования зондом SBE 19 plus от поверхности и до дна, или до глубины 350 м в области континентального склона, с измерением профилей температуры, солености и плотности морской воды. На четырех станциях (с глубинами 25, 50, 100 и 500 м) производится отбор проб воды на химический анализ и определение содержания хлорофилла, на трех станциях (с глубинами 25, 50 и 500 м) выполняются сетные ловы зоопланктона. С 2012 года к списку измеряемых параметров добавились флюоресценция хлорофилла и мутность. Судовой разрез обычно выполняется раз в две недели, но не реже, чем один раз в месяц.

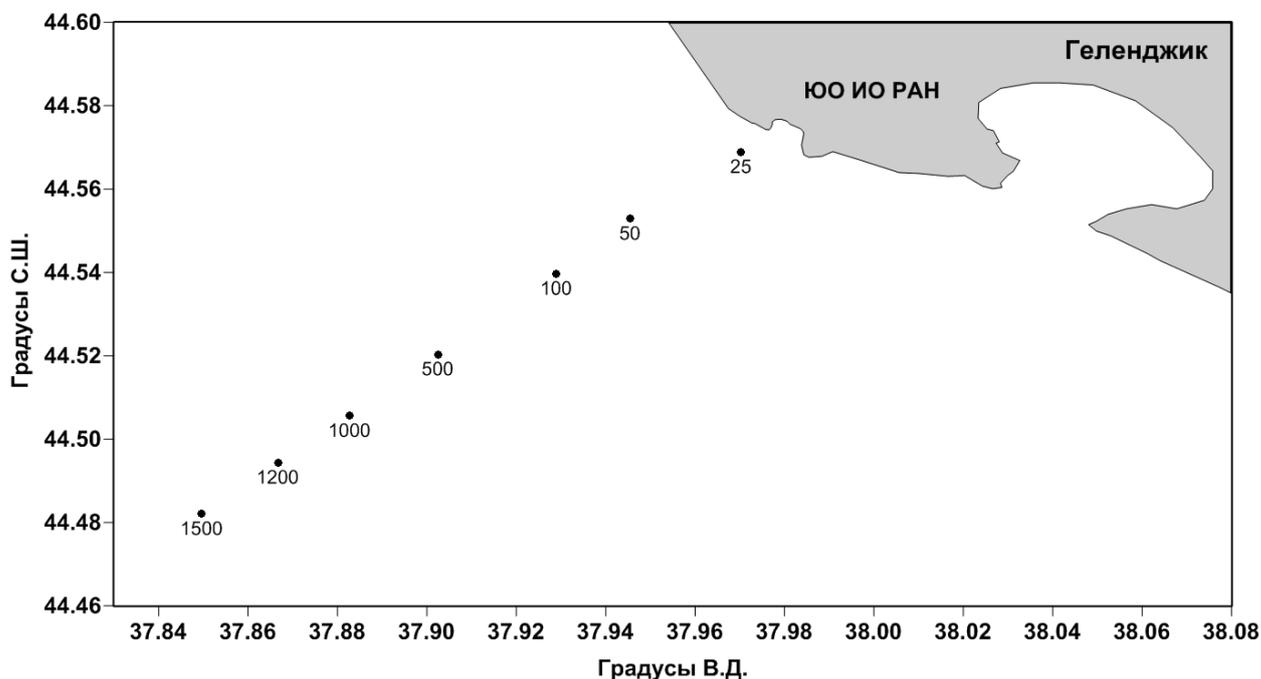


Рисунок 3.1 – Станции (точки) комплексного судового мониторинга состояния прибрежной черноморской морской экосистемы на девятимильном разрезе на траверзе Голубой бухты. Числами указана глубина места в точке каждой станции.

Данные, получаемые на станциях судового разреза, позволяют изучить внутрисезонную, сезонную и межгодовую изменчивость ключевых параметров прибрежной

черноморской экосистемы, а также выявить закономерности изменения значений этих параметров в поперечном берегу направлении.

3.2. Материалы и методы

Как уже указывалось выше, профили температуры, солёности и условной плотности были получены при помощи CTD-зонда SBE-19 plus. Регулярные CTD-зондирования на станциях мониторингового разреза производились с частотой в среднем раз в две недели в период: с 29 апреля по 7 декабря (2010 год), с 17 марта по 14 декабря (2011 год), с 4 апреля по 26 ноября (2012 год), с 29 апреля по 5 ноября (2013 год), с 4 апреля по 28 ноября (2014 год). Всего за пятилетний период по мониторинговому разрезу было сделано 84 выхода МНИС «Ашамба» и получено более 450 профилей вышеуказанных гидрофизических характеристик. Первичные CTD-данные были отфильтрованы и усреднены с вертикальным шагом 1 метр.

Мониторинговый 9-мильный разрез на траверзе Голубой Бухты (г. Геленджик) включал в себя 7 станций с глубинами 25, 50, 100, 500, 1000, 1200 и 1500 метров (рис. 3.1). Точка с глубиной 100 м располагалась на бровке шельфа, и реальная глубина станции в каждом отдельном рейсе из-за дрейфа судна могла меняться от 70 до 110 м. Также нужно отметить, что в некоторых случаях при плохих погодных условиях работы велись только до точки с глубиной 500 м. Иногда в дополнение к станциям в «стандартных» точках на разрезе выполнялись одна или несколько станций в других точках. Поскольку мониторинговый разрез оканчивался точкой станции с глубиной места 1500 м, а расстояние между соседними точками станций составляло 1.0-1.5 мили, район исследований охватывал достаточно подробно как шельфовую зону, подверженную собственным модам изменчивости, так и часть континентального склона, находящуюся под сильным влиянием Основного черноморского течения (ОЧТ) и мезомасштабных вихрей.

3.3 Сезонный и годовой ход основных гидрофизических параметров (температура, солёность, плотность) в районе исследований с 2010 по 2014 год

На рисунках 3.2-3.7 представлен годовой ход температуры, солёности и условной плотности на станции с глубиной 500 м в 2010-2014 гг. Распределение этих гидрофизических параметров на остальных станциях, за исключением самых мелководных (< 50 м) имело схожий характер.

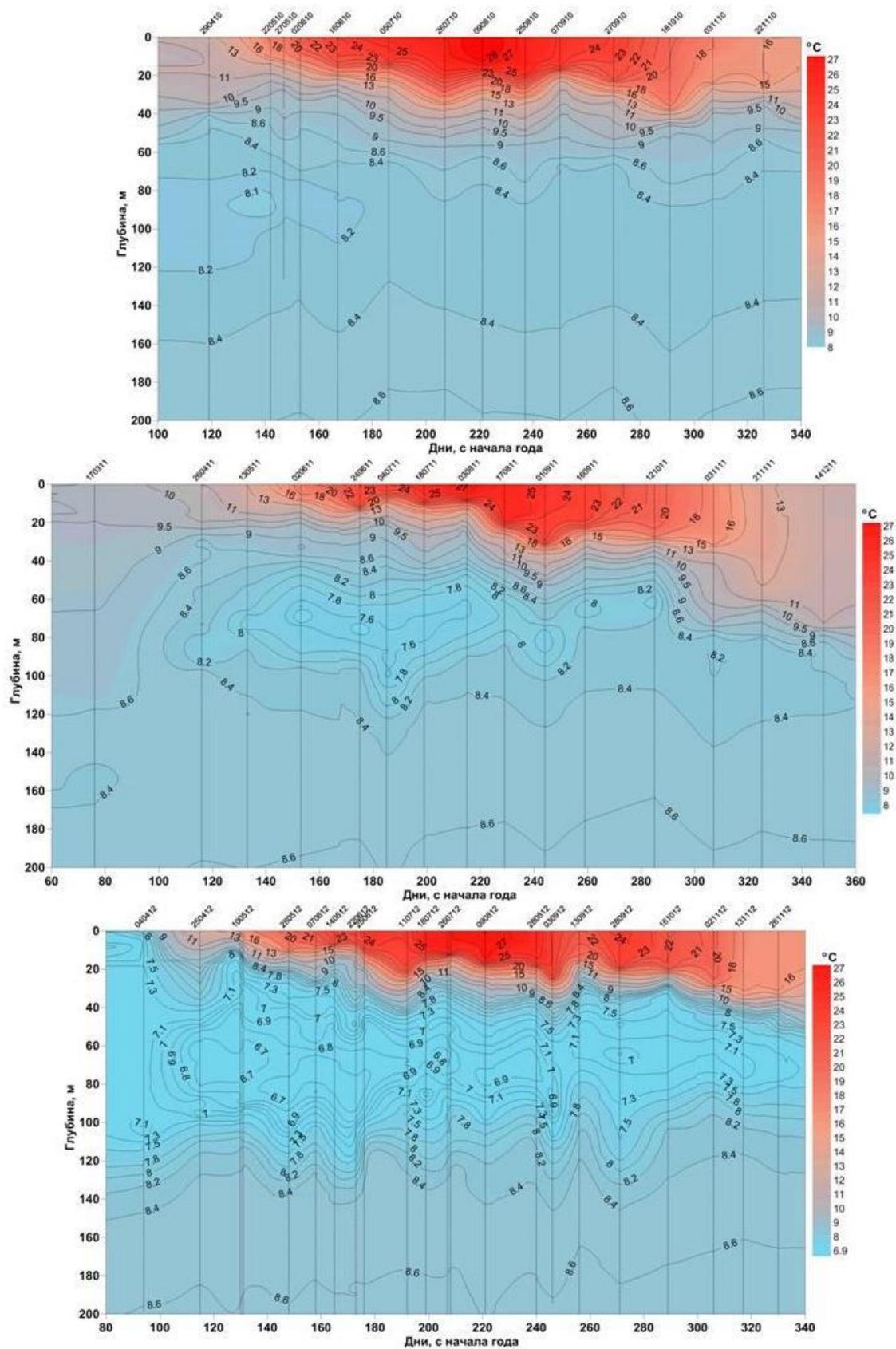


Рисунок 3.2 – Годовой ход температуры на станции с глубиной 500 м в 2010 (вверху), 2011 (в середине) и в 2012 году (внизу)

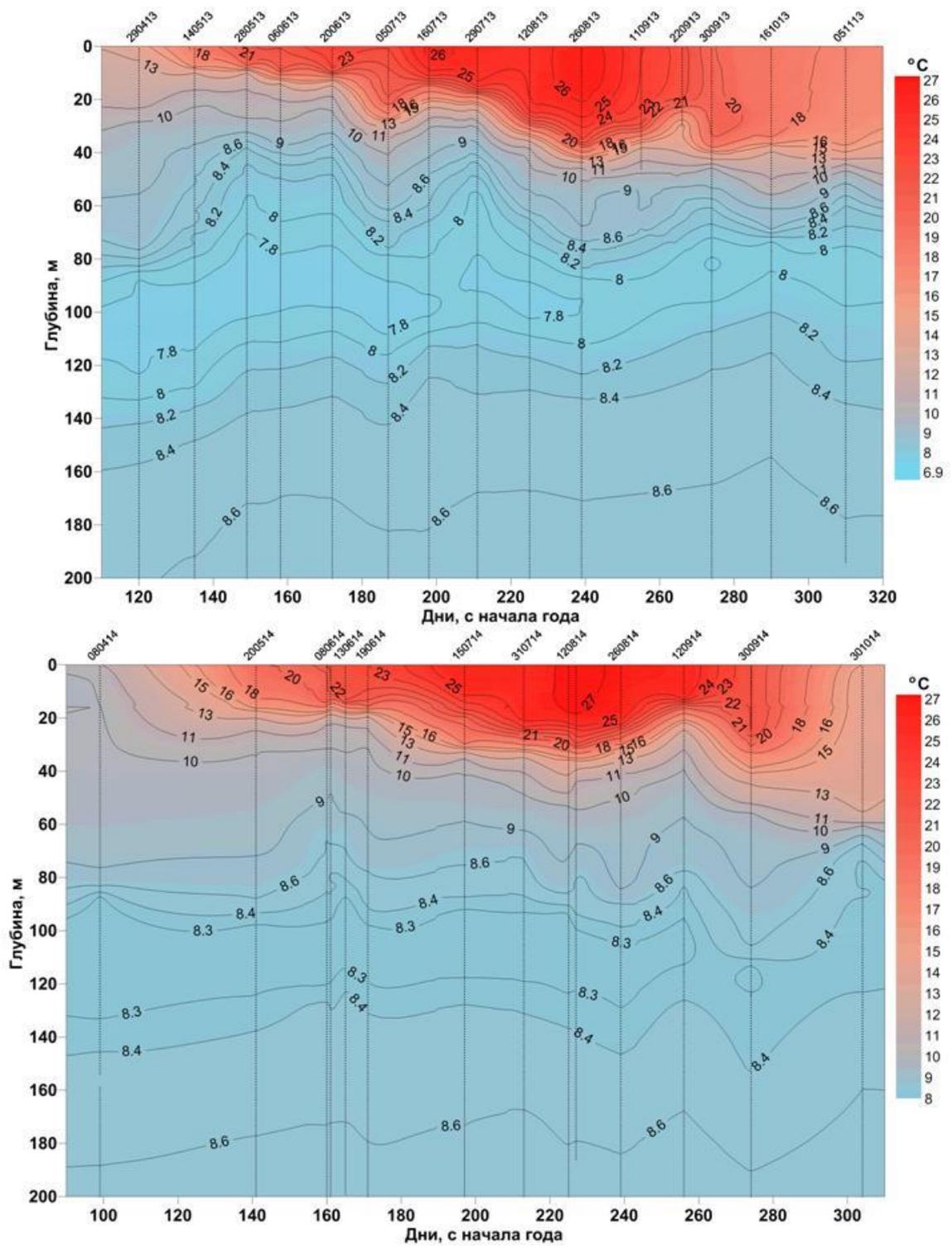


Рисунок 3.3 – Годовой ход температуры на станции с глубиной 500 м в 2013 (вверху) и 2014 году (внизу)

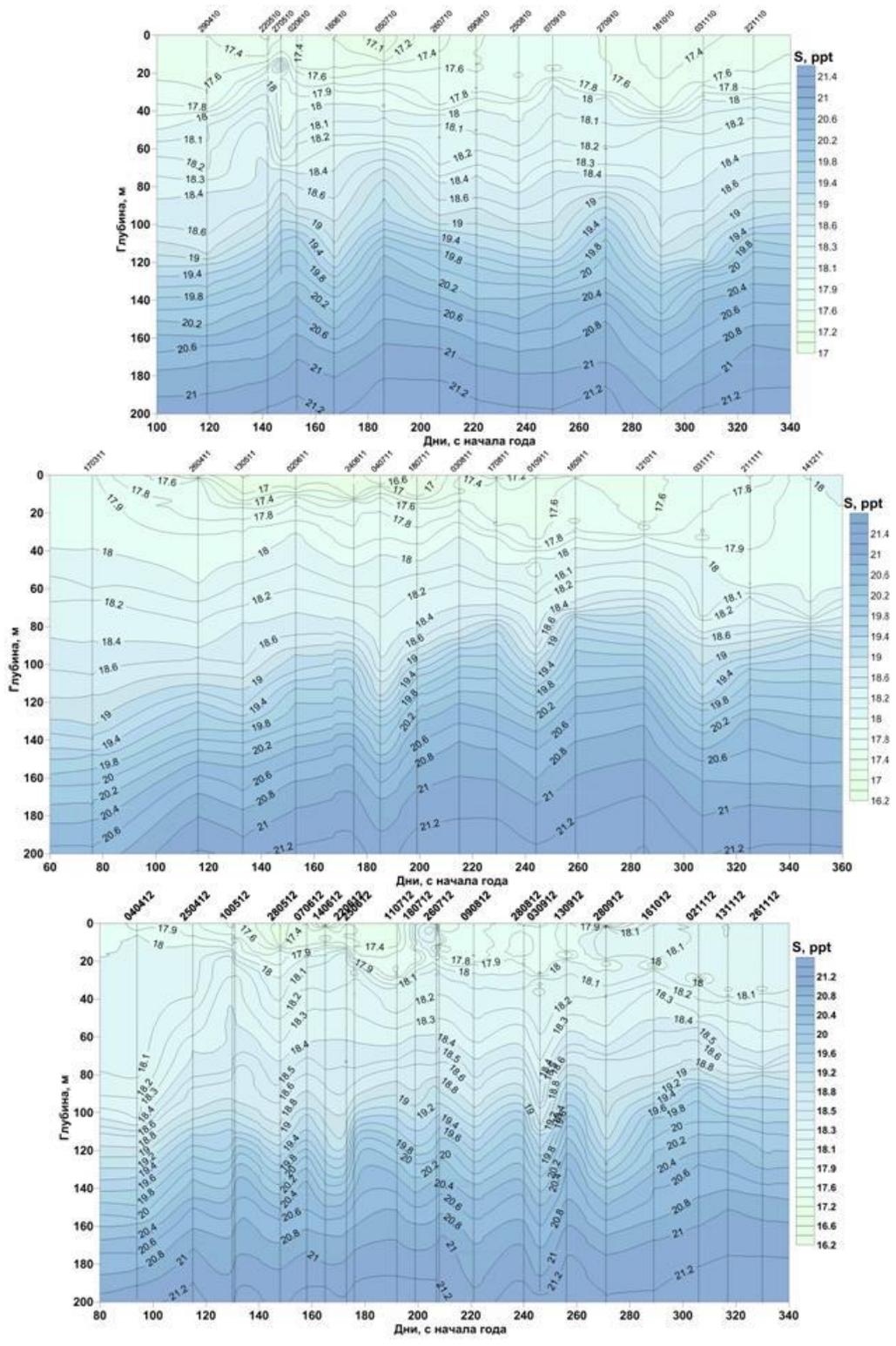


Рисунок 3.4 – Годовой ход солёности на станции с глубиной 500 м в 2010 (вверху), 2011 (в середине) и в 2012 году (внизу)

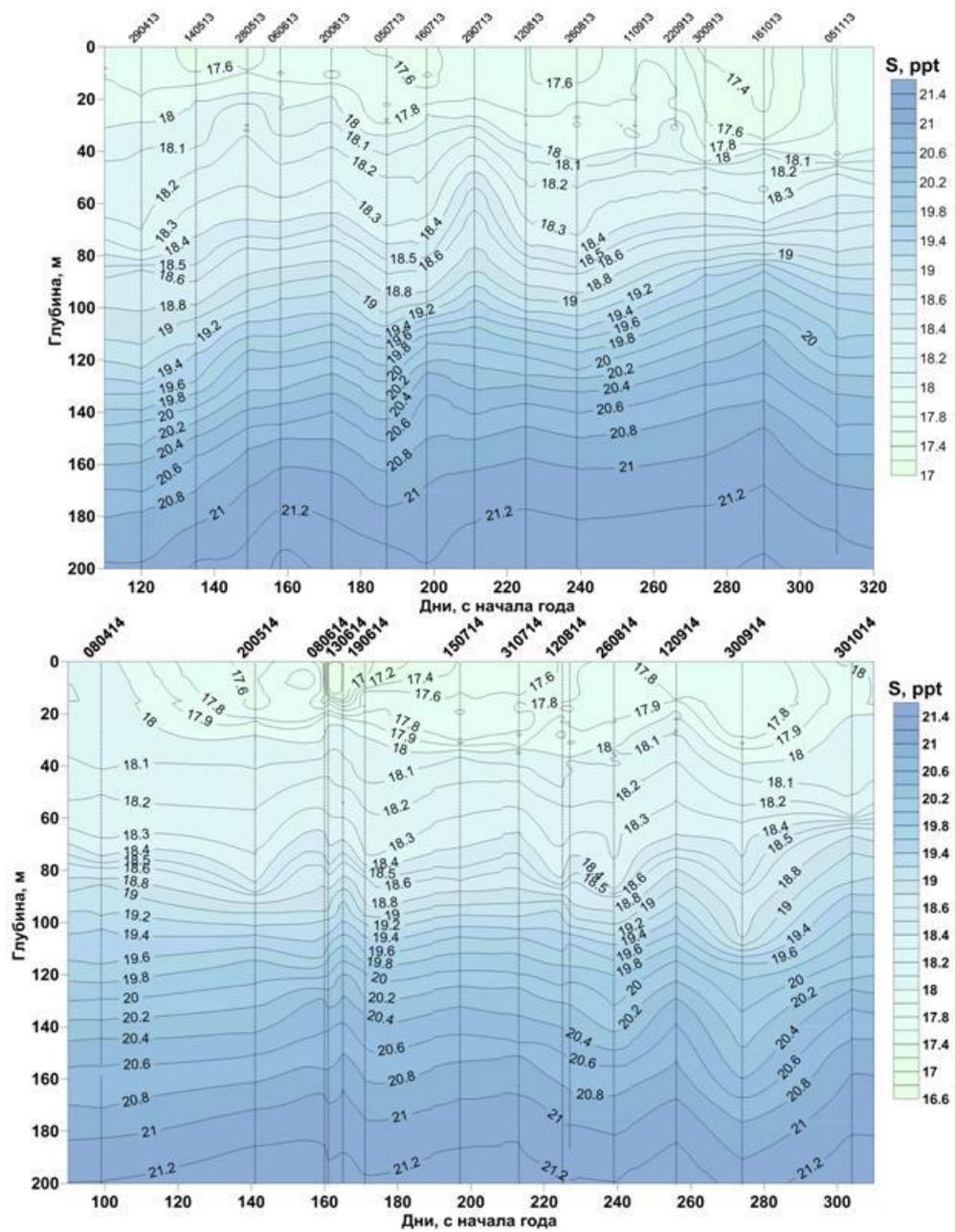


Рисунок 3.5 – Годовой ход солёности на станции с глубиной 500 м в 2013 (вверху) и в 2014 году (внизу)

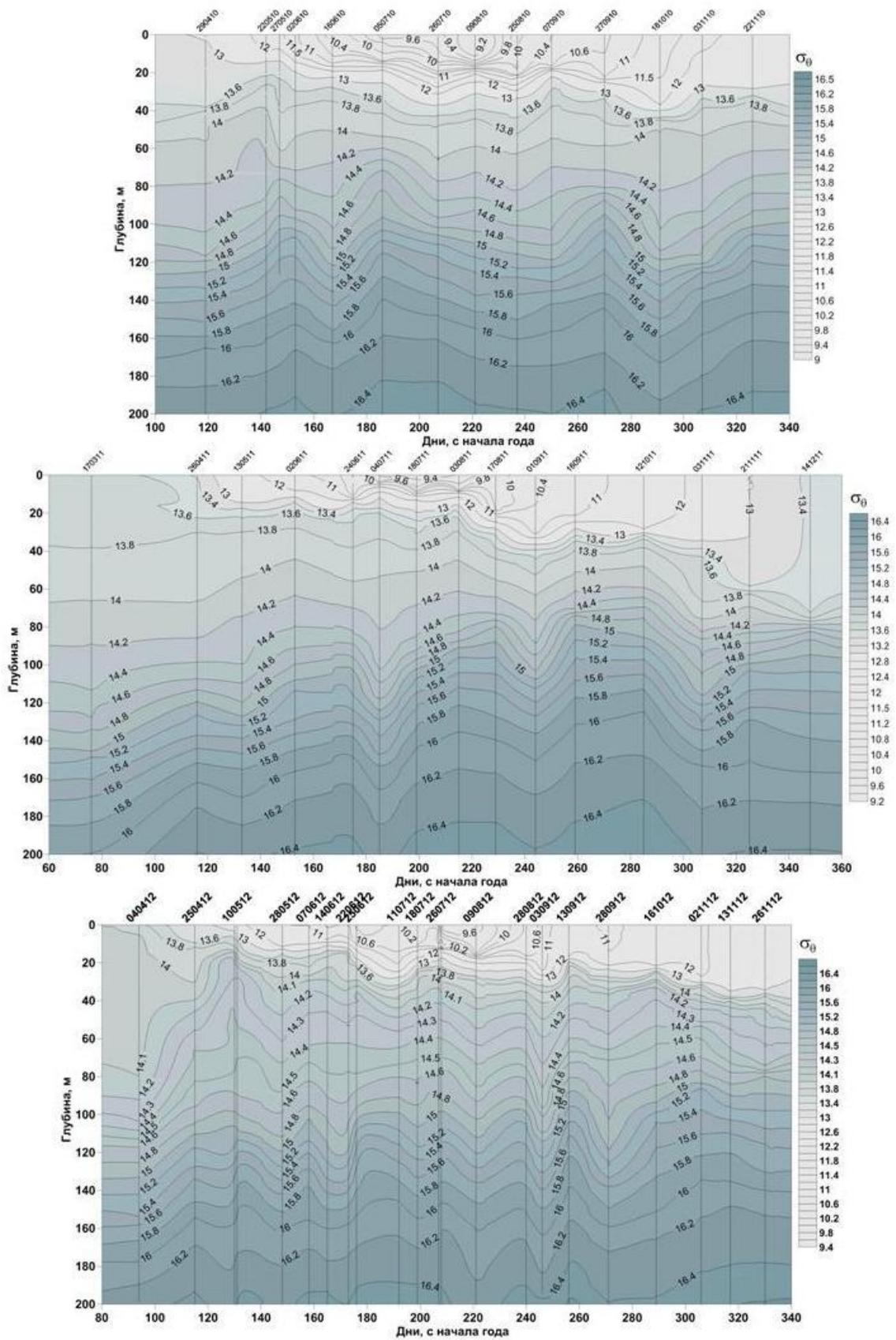


Рисунок 3.6 – Годовое изменение условной плотности (σ_θ) на станции с глубиной 500 м в 2010 (вверху), 2011 (в середине) и в 2012 году (внизу)

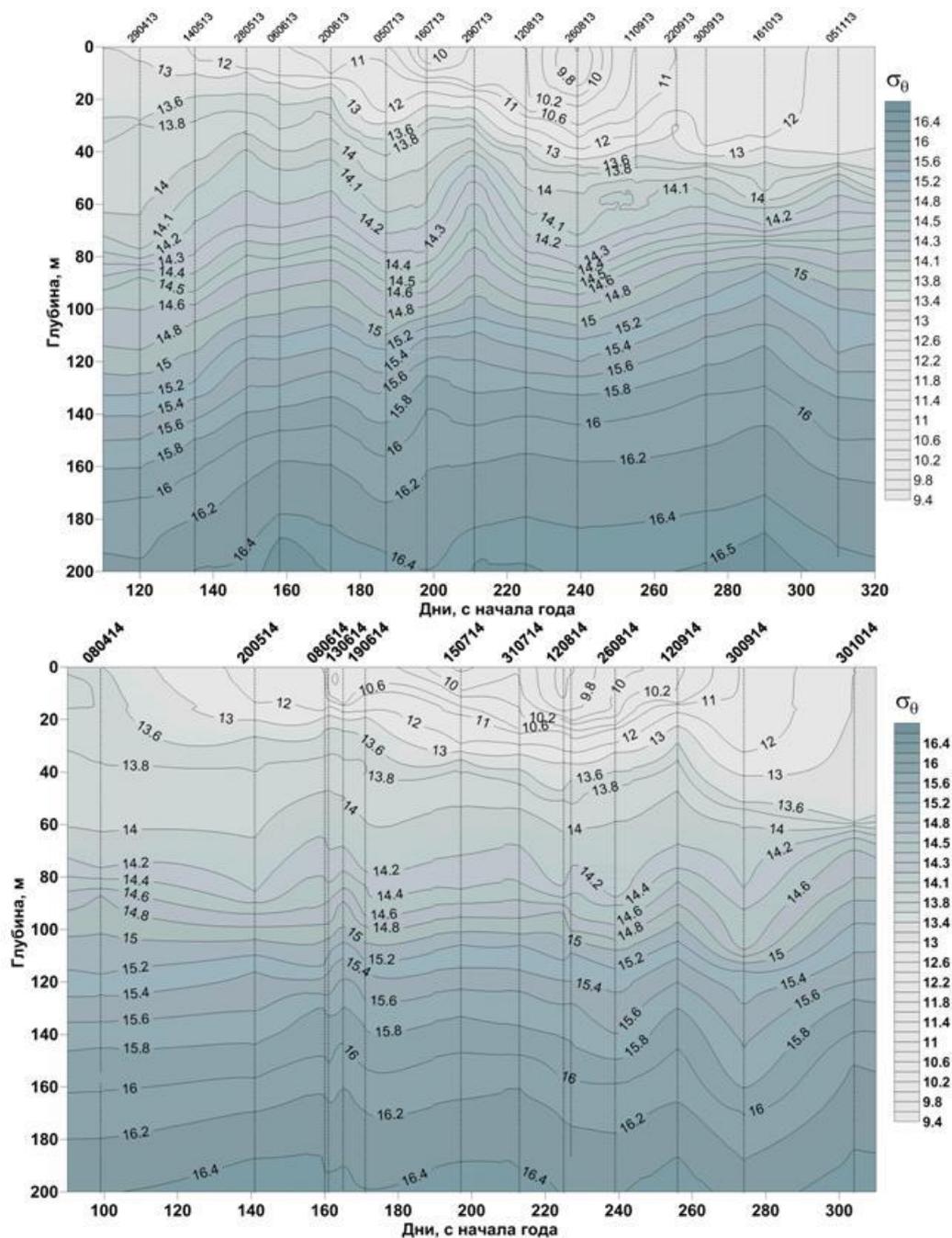


Рисунок 3.7 – Годовое изменение условной плотности (σ_{θ}) на станции с глубиной 500 м в 2013 (вверху) и в 2014 году (внизу)

Максимальная температура в поверхностном слое за весь период наблюдений была зафиксирована в начале августа 2010 г и составила 29.06 градусов. Динамика температуры в холодном промежуточном слое и верхнем квазиоднородном слое за наблюдаемый период описана ниже в отдельных разделах.

Динамика солености приповерхностного слоя (СПС), определяемая как средняя соленость в верхнем 5-м слое, была следующей. Было установлено, что минимальные значения СПС наблюдаются, как правило, в мае-июне, а иногда - и в июле, обусловленные

совместным влиянием паводковых вод и интенсивными осадками, вызывающими спорадическую активность берегового стока.

Абсолютное минимальное значение СПС (15.84 psu), было зарегистрировано 4 июля 2011 года в точке станции над глубиной 1200 м. На остальных точках станций в этот день также было зарегистрировано минимальное значение солености в приповерхностном слое. Максимальное значение поверхностной солености – 18.19 psu – было получено 28 сентября 2012 года в точке станции с глубиной 1000 м. Средняя соленость в верхних пяти метрах за весь период наблюдений по всем точкам составила 17.56 psu.

Внутригодовые тренды СПС имеют схожий характер во всех точках наблюдения, однако на близких к берегу станциях (до 5 миль от берега, или до глубины 500 метров) короткопериодные колебания солености выражены сильнее, чем на станциях, удаленных от берега (6-9 миль, глубина 1000-1500 м), видимо, по причине более сильного влияния изменчивого берегового стока.

Аномально низкие значения СПС были зарегистрированы в период с 13 мая по 18 июля 2011 года, т.е., на протяжении более двух месяцев. Данная аномалия СПС совпала с длительным периодом ветрового затишья (средняя скорость ветра в этот период равнялась 0.15 м/с, штормов не наблюдалось). Сильные осадки, длившиеся с начала 2011 года (среднемесячные суммы осадков с января по июнь были 48.5 мм, по сравнению со средним значением этой величины за все 5 лет - 26 мм) и вплоть до середины июля, вкупе с очень слабым ветровым перемешиванием, привели к сильному опреснению воды, как в приповерхностном слое, так и в ВКС в целом. Любопытным фактом является то, что минимум значений СПС в этот период наблюдался не у берега, а на станциях с глубинами 1000-1500 м, где соленость упала ниже 16 psu. При этом, как уже указывалось, абсолютный минимум (15.84 psu), был установлен на станции с глубиной 1200 м. Очевидно, что имела место адвекция сильно опресненной вод от берега, свидетельствующая о существовании субмезомасштабных процессов, осуществляющих поперечный берегу водообмен.

Представляет интерес описание межгодовой и межсезонной динамика верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) и сезонного термоклина в районе исследований в период с 2010 по 2014 год.

Формирование ВКС начинается в конце апреля-начале мая и связано с повышением температуры воздуха и ветровым затишьем, наступающим в этот период. Традиционно толщина ВКС определяется по профилю температуры, и его нижней границей считается горизонт, начиная с которого происходит резкое уменьшение температуры (увеличение амплитуды ее отрицательного градиента). Ниже располагается сезонный термоклин, за

нижнюю границу которого был взят горизонт с температурой 10 °С. На рис. 3.8 показана общая картина динамики изменения толщин ВКС и термоклина на всех станциях за весь период наблюдений. И ВКС, и термоклин имели схожую структуру на всех станциях наблюдаемого разреза, однако оба они были мощнее (толще) на ближних к берегу станциях.

В течение года обычно наблюдалось постепенное увеличение ВКС. Исключение составил 2011 год, в котором с мая по июль была зафиксирована аномально низкая поверхностная соленость и одновременно, очень слабая ветровая активность. Толщина ВКС уменьшалась в этот период, достигнув минимальных летних значений за весь период наблюдений – 4-6 метров. Следует отметить, в годы с развитым холодным промежуточным слоем средняя толщина ВКС была меньше на 5-7 метров, чем в те годы, когда ХПС не сформировался. Например, июне 2010 г толщина ВКС была почти вдвое больше, чем в июне 2012.

Общая картина динамики средней температуры и солености в ВКС показана на рисунках 3.9 и 3.10.

Средняя толщина и температура ВКС по месяцам показана на рис. 3.11а и 3.11б, соответственно. Максимального прогрева верхний квазиоднородный слой во все годы достигал в августе, при этом, за исключением 2013 г., среднемесячная температура всегда превышала 26 °С. Любопытно, что в 2012 г., несмотря на катастрофический ливень 6-7 июля, соленость ВКС в теплый период года была максимальной за весь рассматриваемый период (рис. 3.11в). Не вполне понятной является сильная межгодовая изменчивость толщины термоклина (рис. 3.11г). Например, в 2012 г. ее среднее значение за теплый период года было менее 10 м, тогда как в 2014 г. оно превышало 20 м. В общем и целом толщина термоклина положительно коррелирует с толщиной ВКС, а толщина ВКС тем больше, чем сильнее ветровая активность, которая является основным источником турбулентного перемешивания в верхних слоях моря в теплый период года.

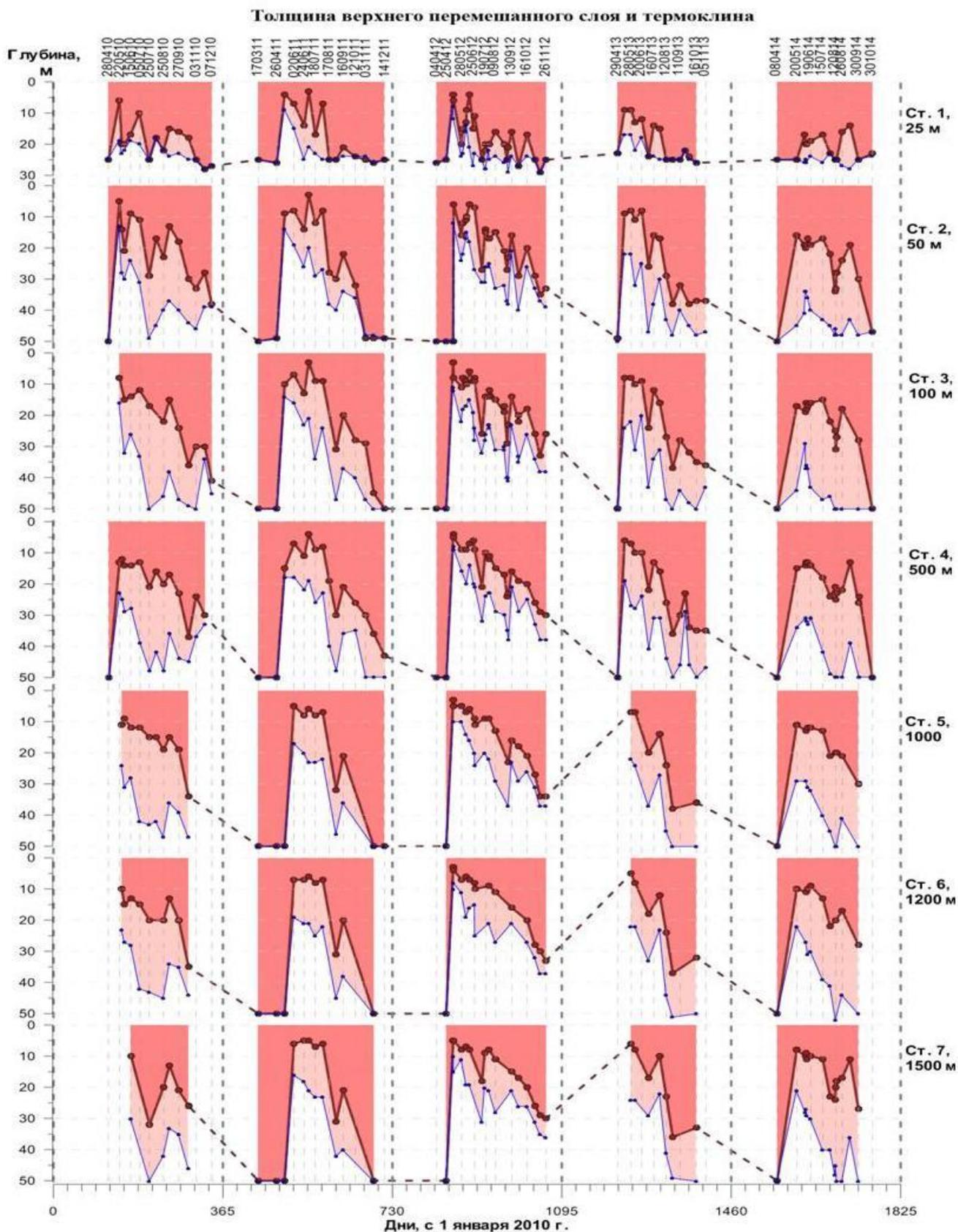


Рисунок 3.8 Глубина нижней границы верхнего квазиоднородного слоя (красная кривая) и нижней границы термоклина (10 °С, синяя кривая) на семи мониторинговых станциях (глубины 25, 50, 100, 500, 1000, 1200 и 1500 м) за весь период наблюдений (2010-2014 гг.).

За ноль по оси абсцисс принято начало 2010 г., пунктиром обозначены переходы к следующим годам.

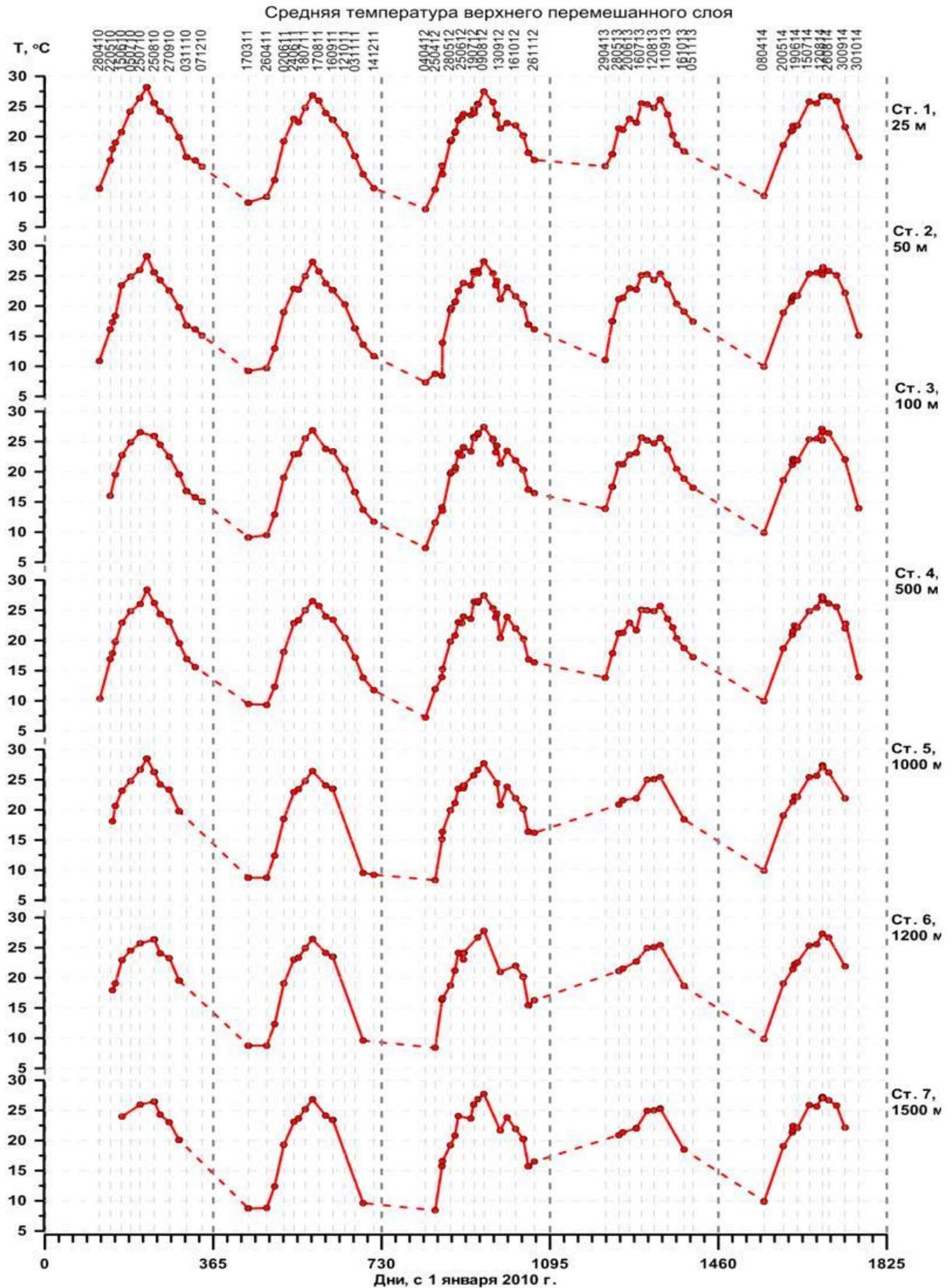


Рисунок 3.9 – Средняя температура верхнего квазиоднородного слоя на семи мониторинговых станциях (глубины 25, 50, 100, 500, 1000, 1200 и 1500 м) за весь период наблюдений (2010–2014 гг.). За нуль по оси абсцисс принято начало 2010 г., пунктиром обозначены переходы к следующим годам.

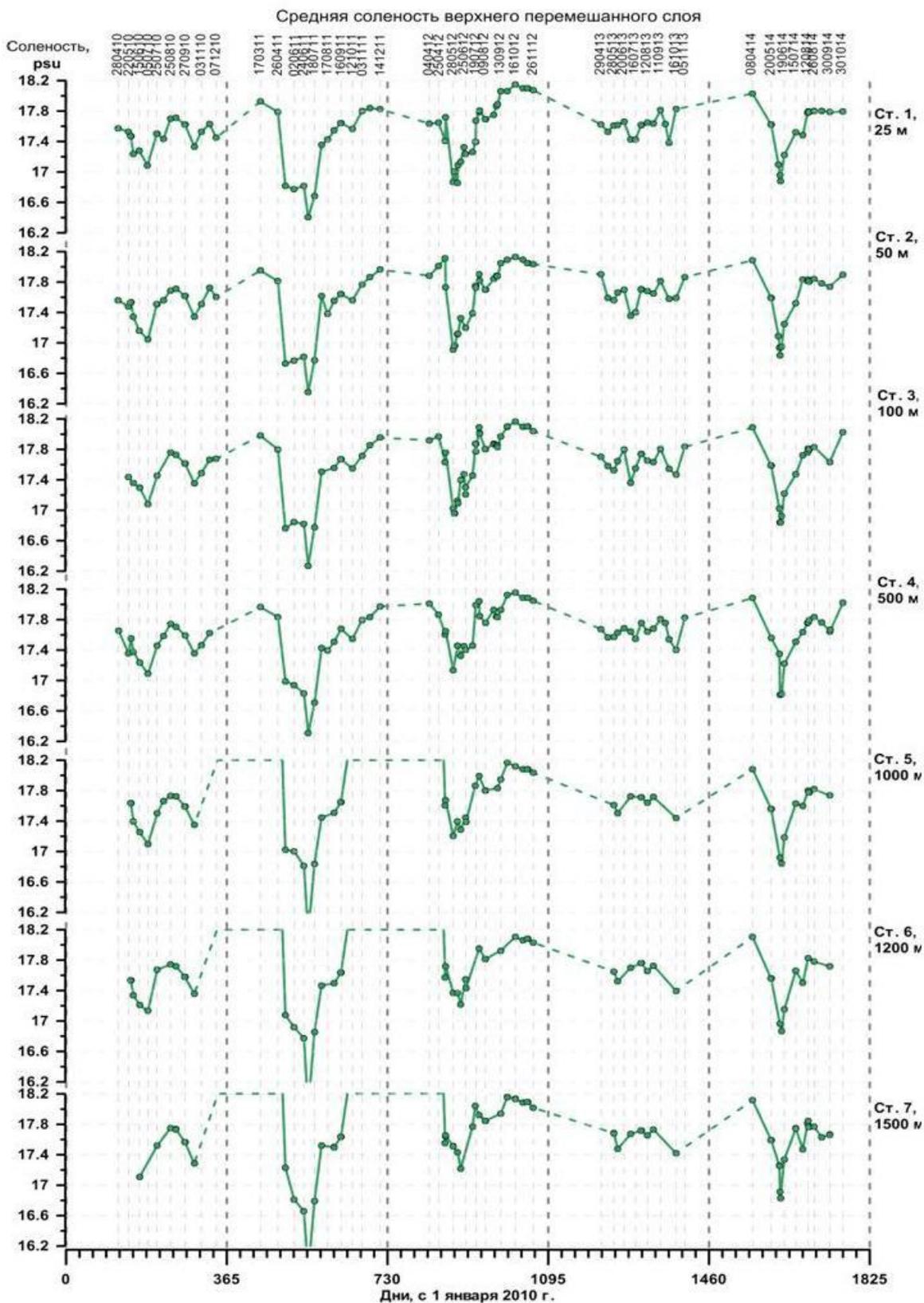


Рисунок 3.10 – Средняя соленость верхнего квазиоднородного слоя на семи мониторинговых станциях (глубины 25, 50, 100, 500, 1000, 1200 и 1500 м) за весь период наблюдений (2010-2014 гг). За нуль по оси абсцисс принято начало 2010 г., пунктиром обозначены переходы к следующим годам

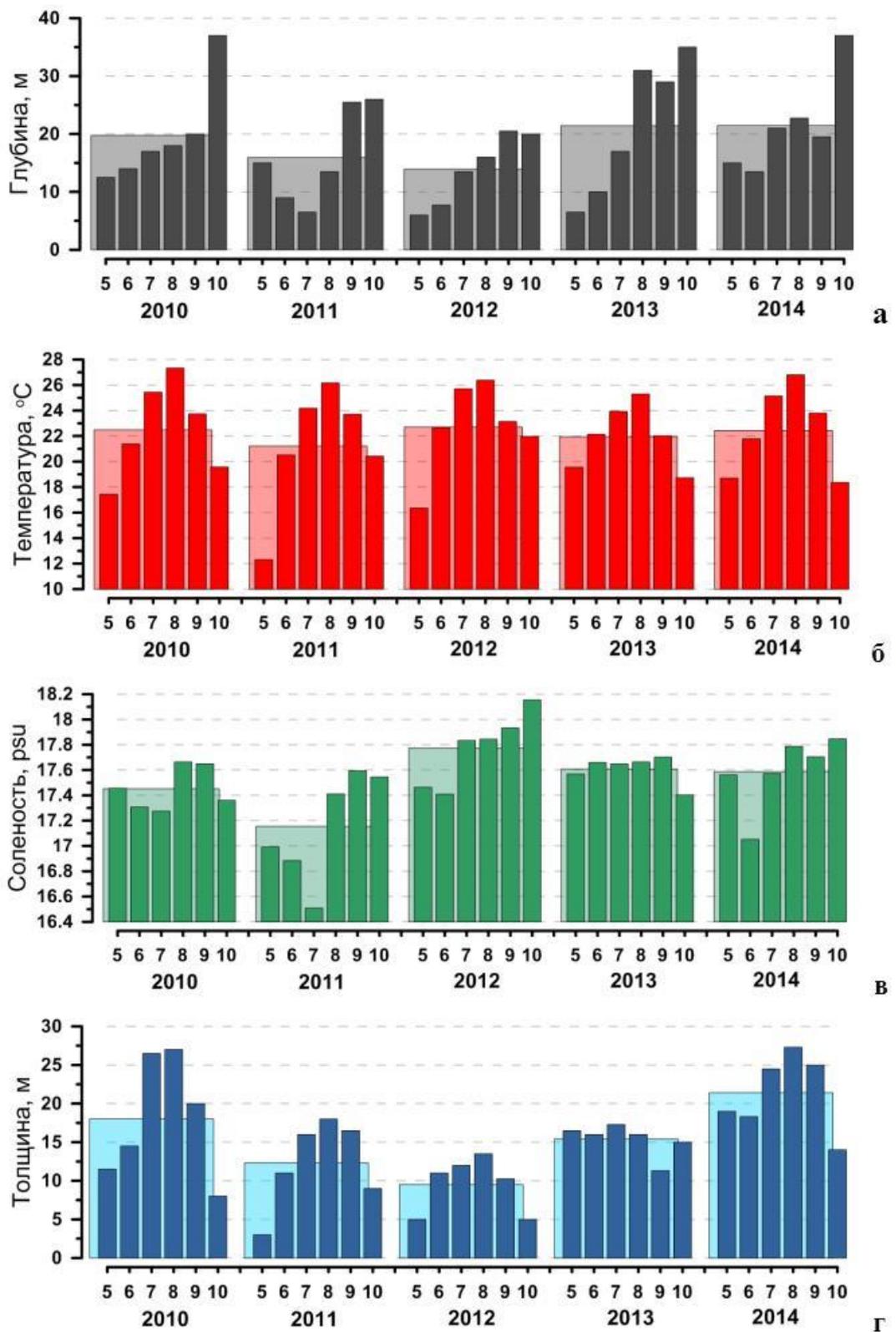


Рисунок 3.11 – Среднемесячные (с мая по октябрь): глубина-толщина (а), средняя температура (б) и средняя соленость (в) верхнего квазиоднородного слоя, а также толщина сезонного термоклина (г) в 2010-2014 гг на мониторинговой станции с глубиной 500 м. Полупрозрачными четырехугольниками на заднем фоне показаны средние значения за май-октябрь, рассчитанные на основе среднемесячных

Опишем кратко межгодовую и межсезонную динамику холодного промежуточного слоя в районе исследований с 2010 по 2014 год. Холодный промежуточный слой (ХПС), традиционно определяемый для Черного моря как область, заключенная изотермами в 8°C , формируется зимой вследствие вертикального конвективно-ветрового перемешивания. Вариации температуры и толщины этого слоя определяют степень вертикальной вентиляции вод и степень их обогащения кислородом и биогенами.

Как правило, ХПС в северо-восточной части Черного моря приобретает свои основные черты в конце апреля – мае, а его температура достигает минимума, а толщина - максимума в июне-июле, когда в исследуемый район приходят воды, образованные в областях интенсивного формирования ХПС. К осени происходит постепенный прогрев ХПС за счет турбулентной диффузии тепла и прямого проникновения солнечной радиации.

Рассматриваемые нами пять лет с 2010 по 2014 гг. в плане ежегодной динамики обновления ХПС были аномальными. В 2010 и 2014 году ХПС в обычном понимании отсутствовал вовсе. Минимум температуры на глубине 90-110 м достигал в этих годах только $8.1-8.3^{\circ}\text{C}$. Холодная зима 2011-2012 гг., наоборот, сформировала огромной величины холодный промежуточный слой, который в своем пике в мае был почти стометровой толщины (рис. 3.12 и рис.3.13а) и просуществовал не только весь этот год, но и следующий, 2013 г., несмотря на то, что зима 2012-2013 г. была теплой и радикального обновления вод ХПС не происходило.

В 2011 г. ХПС, в своих привычных изотермических границах 8°C , начал формироваться в начале мая, в начале июля достиг максимальной толщины, составившей 59-67 метров, увеличиваясь по мере удаления от берега. (59 метров наблюдалось на станции с глубиной 500 м, 67 – на станции с глубиной 1500 м), но исчез к концу сентября: температура воды стала везде выше 8°C .

В 2012 г. максимальная толщина ХПС была зафиксирована сразу с начала наблюдений, 4 апреля, и составила 123 метра на станции с глубиной 500 м (на более глубоких станциях в тот день измерений не проводилось). Далее в течение года толщина ХПС колебалась от 46 до 111 м, в целом постепенно уменьшаясь. Максимальные ее значения также были на самой удаленной от берега станции с глубиной 1500 м.

В 2013 г. толщина ХПС сохранялась примерно одинаковой с начала периода измерений до конца июля, составляя 40-50 м, после чего начала уменьшаться и к концу периода измерений составляла 18-20 м.

Минимум температуры в ядре ХПС приведен на рис 3.13б. В июне 2011, 2012 и 2013 гг. он составил 7.43 , 6.61 и 7.69°C соответственно.

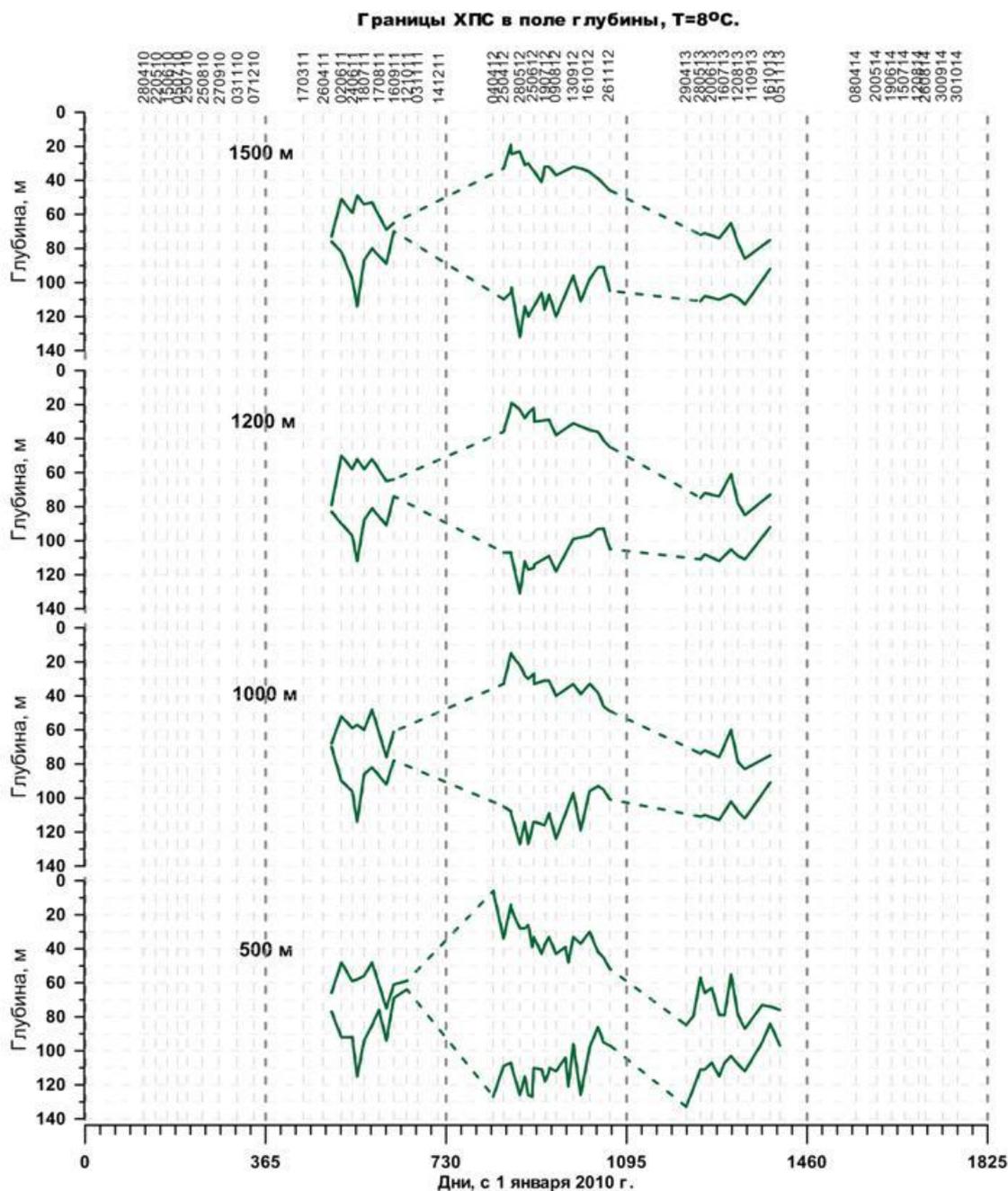


Рисунок 3.12 – Верхняя и нижняя границы холодного промежуточного слоя (изотермы 8 °С) на станциях с глубинами 500, 1000, 1200 и 1500 м за весь период наблюдений (2010-2014 гг). За нуль по оси абсцисс принято начало 2010 г., пунктиром обозначены переходы к следующим годам

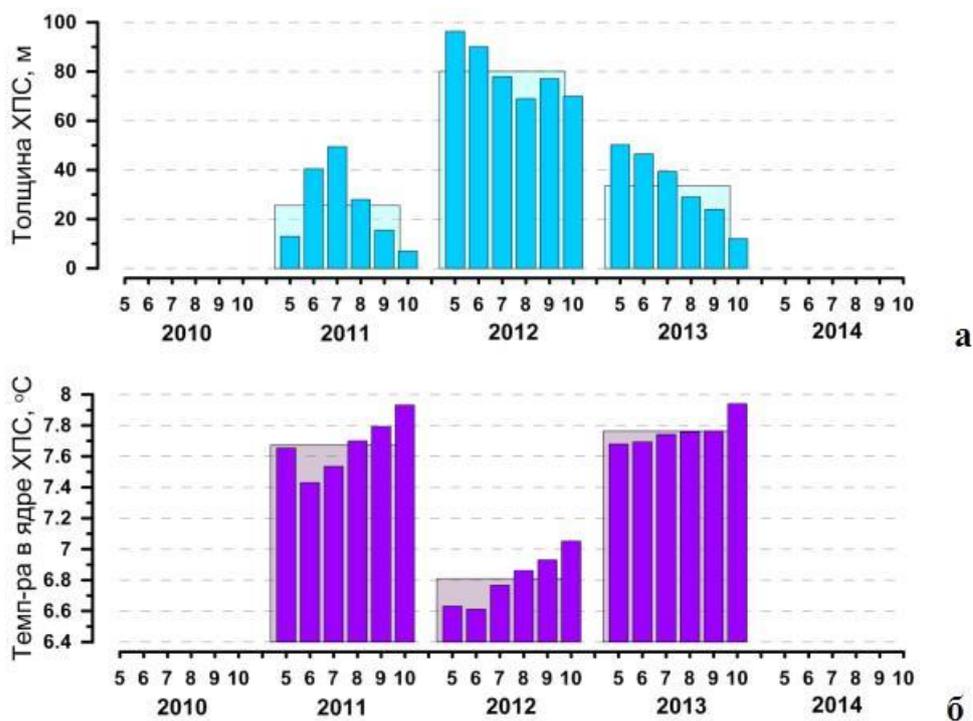


Рисунок 3.13 – Среднемесячные (с мая по октябрь) **толщина холодного промежуточного слоя (а), и температура ядра ХПС (б)** в 2010-2014 гг на мониторинговой станции с глубиной 500 м. Полупрозрачными четырехугольниками на заднем фоне показаны средние значения за май-октябрь, рассчитанные на основе среднемесячных

Измерения, выполненные в зимне-весенний сезон 2015 г. показывают, что вследствие довольно теплой зимы 2014-2015 гг., воды с температурой ниже 8°C опять не сформировались. Таким образом, ХПС в его традиционном определении отсутствует второй год подряд. Очевидно, что дальнейшее потепление регионального климата, связанное с общей глобальной тенденцией климатического потепления может создать условия, при которых традиционное определение ХПС окажется бесполезным, поскольку зимнее выхолаживание и перемешивание будет формировать воды с температурой выше 8°C. В связи с этим, становится актуальным введение нового определения ХПС. Над его научной основой следует работать, ибо простое смещение температурных границ с 8°C на 8.5°C, например, не отражает физики процесса формирования ХПС.

4 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ УЧЕТА ДНЕВНОГО ХОДА ТЕМПЕРАТУРЫ ПО ДАННЫМ СКАНЕРА SEVIRI

Одной из проблем определения температуры поверхности океана (ТПО) по спутниковым данным является учет суточного хода температуры. Его величина в приповерхностном (метровом) слое может достигать нескольких градусов и зависит от многих условий: интенсивности приходящей коротковолновой (солнечной) радиации, ветрового-волнового перемешивания, толщины верхнего квазиодногодного слоя, наличия пленок поверхностно-активных веществ и некоторых других факторов. Сенсор SEVIRI «Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager» установленный на геостационарном спутнике MSG-2, имеет высокую дискретность измерений (0,25 часа) и относительно высокое пространственное разрешение (4 - 6 км) для Черного моря.

Работы по улучшению точности полей ТПО полученных сенсором SEVIRI заключаются преимущественно в совершенствовании существующих алгоритмов восстановления последних из яркостных температур. Основной задачей данного этапа работ является разработка методики оценки изменчивости температуры в цикле дневного прогрева на основе данных, полученных спутниковым сенсором SEVIRI для Черноморского региона.

Использованные данные. Данные ТПО в Черном море, восстановленной по измерениям яркостных температур сенсора SEVIRI, были выбраны из набора данных «OSDPD-L2P-MSG02», предоставляемого GHRSSST (Group for High Resolution Sea Surface Temperature) [11]. Использовались данные второго уровня обработки [12]. Из этого же набора данных была получена информация о приповерхностном ветре и вероятности чистого неба («Probability of clear sky») [13].

Применяемый алгоритм. В данной работе мы применяем техники пространственного фильтрации и кубического сглаживающего сплайна для уменьшения шума спутниковых полей ТПО. Алгоритм сглаживания заключался в следующем:

1) проводится «экранирование» - удаление из дальнейшего рассмотрения точек, в которых параметр «Probability of clear sky» - вероятность чистого неба, меньше заданного значения (значение, использованное в работе – 0,9994);

2) к каждому снимку применяется процедура пространственной медианной фильтрации типа «медиана с размером локального окна», полученного методом минимизации среднеквадратической ошибки - т.е. выбирается размер окна, при котором среднеквадратическое отклонение (СКО) разности температур, измеренных контактными и дистанционными методами, достигает минимума;

3) полученные временные ряды сглаживаются с использованием кубического сглаживающего сплайна. Реализация алгоритма сплайн-сглаживания доступна в среде MatLab под названием «Csaps» и имеет один параметр, косвенно определяющий весовые коэффициенты. Подбор данного параметра, также как и размер локального окна, проводится путем минимизации среднеквадратической ошибки. Пример карты температуры, полученной таким образом, представлен на рис. 4.1.

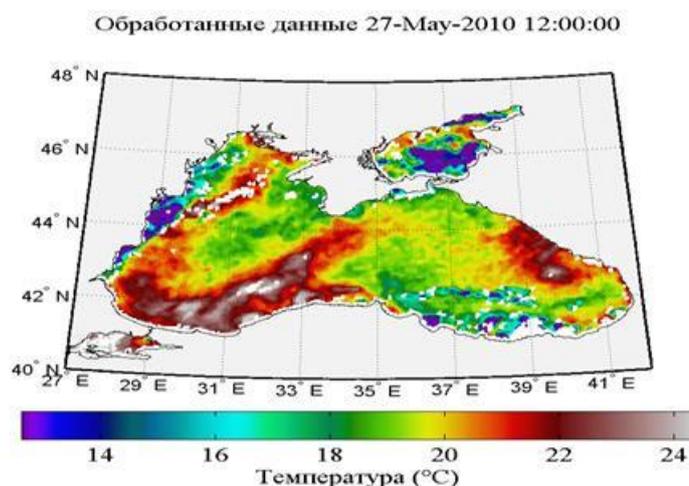


Рисунок 4.1 – Карта температуры с зонами интенсивного дневного прогрева

4) изменение температуры в цикле дневного прогрева dT/dt определяется по потокам тепла и глубине перемешанного слоя:

$$dT/dt = Q/\rho cH, \quad (1)$$

где Q – суммарный поток тепла через поверхность вода-воздух, ρ – плотность воды, c – теплоёмкость воды, H – глубина перемешанного слоя.

5) для теплого сезона максимальная амплитуда дневного хода температуры поверхности моря оценивается по формуле:

$$dT = K/(W+A)^3, \quad (2)$$

где W – скорость ветра, K – коэффициент, зависящий от интегрального потока тепла с учетом статистических характеристик облачности, A – коэффициент учета слабых ветров.

Тестовые проверки методики. При разработки методики были сопоставлены измеренные значения амплитуды суточного хода dT в период в теплый период года (март-август) с рассчитанными значениями DT по формуле (2) с коэффициентами $K = 270$ и $A=2$. Результаты сопоставления, представленные на рис. 4.2, свидетельствуют о хорошем соответствии измеренных и рассчитанных значений. Т.о. разработанная методика учета

дневного хода температуры по данным сканера SEVIRI позволяет использовать спутниковые данные учета изменений температуры поверхности моря с высоким пространственным и временным разрешением.

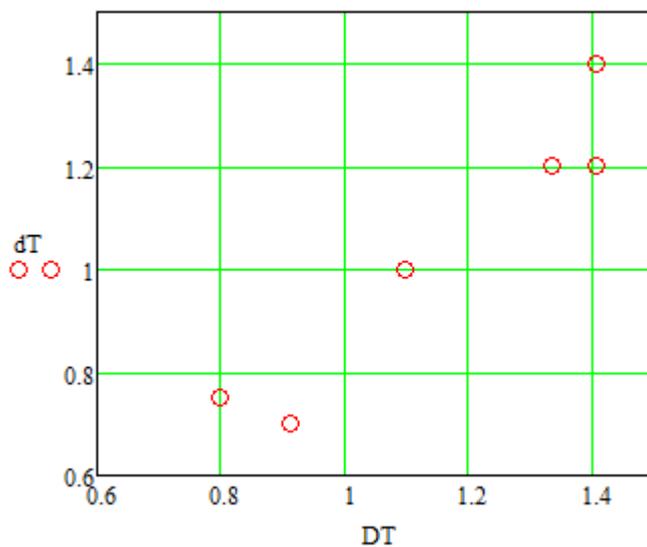


Рисунок 4.2 – Результат сопоставления измеренных (DT) и рассчитанных значений (dT) амплитуды суточного хода температуры поверхности моря

5 ВАЛИДАЦИЯ РЕГИОНАЛЬНОГО АЛГОРИТМА ВОССТАНОВЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ХЛОРОФИЛЛА «А» НА ОСНОВЕ СОПОСТАВЛЕНИЯ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ И КОНТАКТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Разработанный на первом этапе выполнения проекта регионально адаптированный алгоритм восстановления концентрации хлорофилла «а», на втором этапе был проверен и усовершенствован с помощью независимых массивов натуральных наблюдений, не использовавшихся при разработке алгоритма.

Проведенные на первом этапе проекта исследования показали, что коэффициенты линейной регрессии, полученные для имитированного массива SeaWiFS, близки к полученным для квазисинхронных данных MODIS:

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

Был сделан вывод, что соотношение хлорофилла «а» и других цветных пигментов, определяющих точность восстановления концентрации хлорофилла «а» в водах с концентрацией до 1.5 мг/м³, достаточно постоянно и для коррекции спутниковых данных можно использовать простое линейное уравнение пересчёта.

Таблица использованных для проверки достоверности данных приведена ниже (таблица 5.1).

Таблица 5.1 – Исходные данные для валидации алгоритма расчета концентрации хлорофилла «а» по спутниковым данным

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	0.007366	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

В результате проведенной работы были получены уточненные коэффициенты в регрессионных уравнениях расчета концентрации хлорофилла «а» по спутниковым данным, которые повысили точность восстановления концентрации хлорофилла «а» в природных условиях. Были проведены расчеты концентрации хлорофилла «а» по спутниковым данным для 2012 и 2014 гг. и оценен диапазон рассеяния данных, характеризующий точность расчета. Среднеквадратичное отклонение составило 0.082 мг/м^3 (несколько лучше по сравнению с предыдущими данными 0.084 мг/м^3) в диапазоне изменчивости концентрации хлорофилла до 1.2 мг/м^3 .

Откорректированный алгоритм представляет собой следующие операции:

- 1) Производится загрузка интересующих файлов для выбранных районов из архива спутниковых данных OCEANCOLOR-

<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/browse.pl?sen=am> (рис. 5.1).

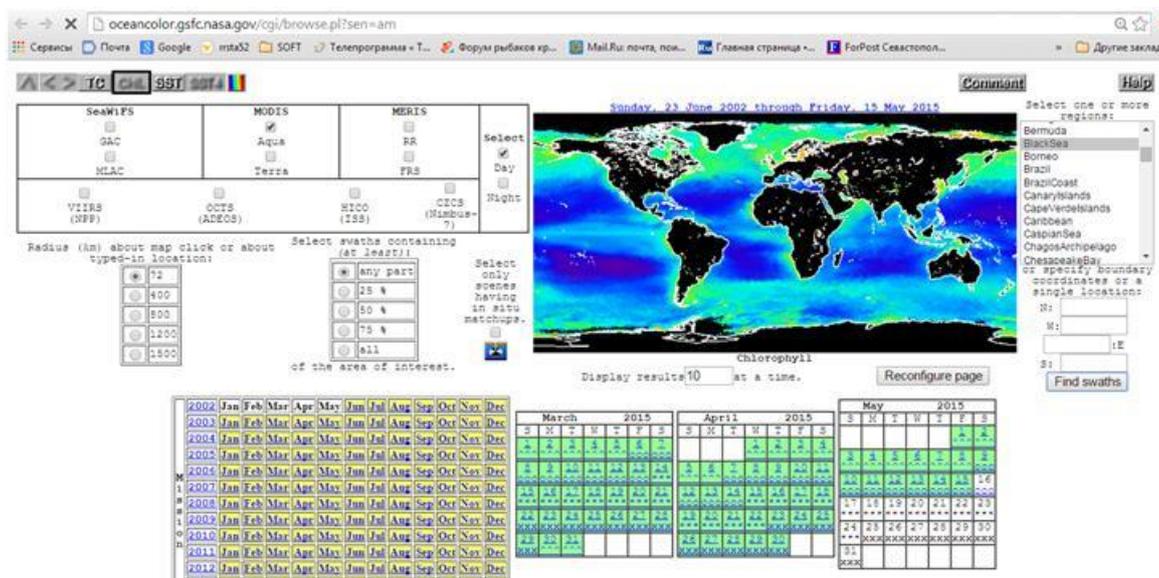


Рисунок 5.1 – Копия интернет-страницы со спутниковыми данными для расчета концентрации хлорофилла «а» по откорректированному регионально адаптированному алгоритму

- 2) Данные загружаются в виде упакованных файлов специализированного формата HDF (спецификацию формата можно посмотреть на <https://www.hdfgroup.org/HDF5/> <http://trac.osgeo.org/geotiff/>), содержащего значения параметров и географическую привязку снимка. Пример названия загружаемого файла - [A2015134110000.L2_LAC_OC](#)
- 3) В результате распаковки файла извлекаются данные концентрации хлорофилла «а» рассчитанные по стандартной методике OC 3.

Для расчёта скорректированных значений хлорофилла «а» используется полученная в результате сопоставления с контактными данными эмпирическая зависимость - формула вида:

$$C_{рег} = C_{спут} * 0.541 - 0.045 \text{ (мг/м}^3\text{)},$$

где $C_{рег}$ – скорректированные значения концентрации хлорофилла,

$C_{спут}$ – рассчитанные по стандартному алгоритму.

Пересчёт проводится для каждой точки снимка. Результатом расчёта является

растровый файл формата GeoTiff и графический файл- изображение в формате GIF.

Диаграмма сопоставления откорректированных данных концентрации хлорофилла «а» ($C_{рег}$) с данными синхронных контактных измерений ($C_{кон}$) в мг/м^3 представлена на рис. 5.2.

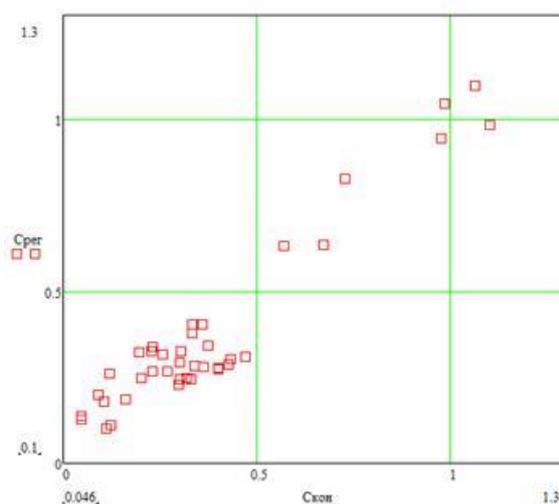


Рисунок 5.2 - Диаграмма рассеяния расчётных и контактных измерений хлорофилла «а»

Результаты сравнительного анализа работы алгоритма до валидации и после нее представлены на рис. 5.3. Различие между первоначальным алгоритмом (CH-old) и его откорректированной версией ($C_{рег}$) на рисунке представлено в виде величины отклонения результатов расчета в мг/м^3 . Из рисунка видно, что откорректированный алгоритм с использованием новых коэффициентов в регрессионной методике несколько уменьшает расчетные значения хлорофилла «а».

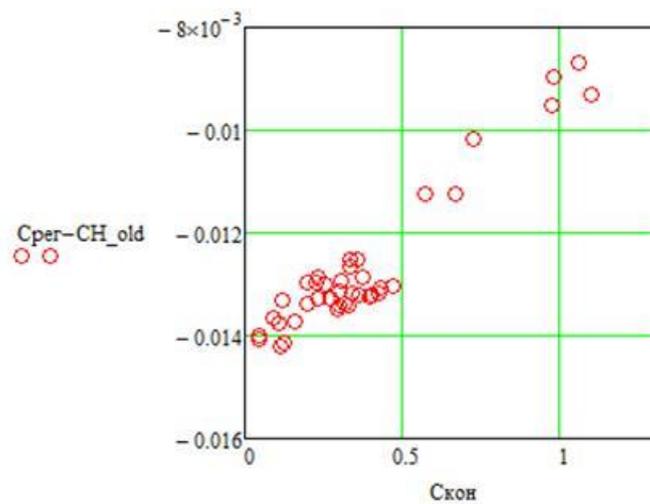


Рисунок 5.3 – Зависимость величины разницы между рассчитанными значениями хлорофилла «а» по первоначальной и откорректированной версии алгоритма от природной концентрации хлорофилла «а» в морской воде

6 ЧИСЛЕННЫЕ РАСЧЕТЫ ЦИРКУЛЯЦИИ ВОД ЧЕРНОГО МОРЯ С УЛУЧШЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ У ПОБЕРЕЖЬЯ ГЕЛЕНДЖИКА В РАЙОНЕ ПОЛИГОНА ИОРАН И ИХ ВЕРИФИКАЦИЯ НА ОСНОВЕ СОПОСТАВЛЕНИЯ С ДАННЫМИ ИЗМЕРЕНИЙ И СПУТНИКОВОЙ ИНФОРМАЦИЕЙ

6.1. Расчеты с использованием модели ИВМ РАН

В данном разделе отчета представлена основанная на примитивных уравнениях численная модель циркуляции Чёрного моря с улучшенным пространственным разрешением прибрежной зоны. Уравнения модели формулируются в двухполлюсной ортогональной системе координат с произвольным расположением полюсов и s -координатой по вертикали. Повышение горизонтального разрешения достигается за счёт смещения полюса в окрестность выделяемой подобласти.

Задача решается на сетке с переменным шагом. Северный координатный полюс смещён в окрестность г. Геленджика, шаг сетки изменяется от 150 м в районе Геленджика до 4,6 км в юго-западной части моря. Проведены расчёты полей течений, уровня моря, температуры и солёности при заданном атмосферном воздействии за 2011-2012 гг. Модель способна воспроизводить крупномасштабную циркуляцию Чёрного моря, а также субмезомасштабную изменчивость прибрежных течений.

Одной из основных тенденций развития моделирования и гидродинамического прогноза морской циркуляции является повышение пространственного разрешения. Развитие измерительных технологий позволяет изучать все более сложные гидродинамические процессы, анализировать тонкую структуру гидрофизических полей, их мезомасштабную и субмезомасштабную изменчивость.

Развитие численных моделей, повышение их адекватности и точности, также связано с повышением пространственного разрешения. Решение актуальных задач оперативной океанографии стимулирует построение эффективных методов расчёта динамики прибрежных течений в широком спектре их пространственно-временной изменчивости [15-20].

Особенности динамики Чёрного моря связаны с его большой глубиной и относительно небольшим, по сравнению с океаном, горизонтальным размером. Глубина открытой части Чёрного моря около 2 км, а горизонтальный размер – порядка 1000 км. Основным элементом крупномасштабной циркуляции Чёрного моря является Основное Черноморское Течение (ОЧТ), его ширина около 40-50 км, скорости от 40-50 см/с до 80-100 см/с, расход 3-4 Св. [16]. Для моделирования и прогноза циркуляции Чёрного моря к настоящему времени создано несколько современных моделей [16-27].

К мезомасштабной изменчивости морской и океанической циркуляции относят процессы с горизонтальным масштабом порядка радиуса Россби, который в Чёрном море составляет 20-30 км [21]. Это – квазистационарные антициклоны, формирующиеся на внешней стороне ОЧТ (Крымский, Севастопольский антициклоны, антициклоны вдоль Кавказского побережья и т.д.), черноморские внутривихревые линзы, волны Россби годового периода, излучаемые от восточного берега [25, 26]. Воспроизведение крупномасштабной структуры и мезомасштабной изменчивости Чёрного моря можно проводить на сетках с шагом по горизонтали около 4-5 км, на интервалах по времени от нескольких месяцев до нескольких лет.

Дальнейшее увеличение пространственного разрешения измерительных систем и численных моделей стимулируют исследование все более тонкой структуры гидрофизических процессов [28-33]. Наблюдения и расчёты показывают наличие многочисленных образований более мелкого масштаба, которые можно отнести к субмезомасштабной изменчивости. Это – вихри, связанные с термическими фронтами, спиральные вихри, шельфовые динамические структуры [30-33] и т.д. Горизонтальные размеры таких особенностей около одного-нескольких километров (1-10 км), время жизни – около 2-3 суток [30]. По сравнению с мезомасштабными вихрями они нестационарные, не находятся в геострофическом равновесии. Значительное влияние на субмезомасштабную динамику оказывают географические условия (наличие береговых особенностей, топографические неоднородности, неустойчивость пресноводных плюмов [30]) и внешнее воздействие (неоднородность ветра, потоков тепла и влаги). В [34] на основе лабораторных экспериментов, теории подобия (с оценкой масштабов природных явлений) и аналогии со спецификой сингулярных решений нелинейных уравнений мелкой воды делается вывод о том, что динамика спектральных вихрей верхнего перемешанного слоя океана может быть связана с конвективными процессами.

Цель работы – воспроизвести основную структуру циркуляции в Чёрном море и элементы её мезо и субмезомасштабной изменчивости в рамках единого вычислительного эксперимента – сквозного расчета на сетке с переменным шагом. Спектр моделируемых процессов включает три семейства движений: крупномасштабную циркуляцию (ОЧТ, горизонтальный размер $\approx 100-1000$ км), мезомасштабные процессы (крупные квазигеострофические вихри $\approx 20-30$ км) и субмезомасштабную изменчивость (нелинейные нестационарные вихри $\approx 1-10$ км). Субмезомасштабная изменчивость воспроизводится локально, у северо-восточного побережья, где шаг сетки составляет 150-200 м. Спектр указанных движений может быть описан в рамках гидростатической модели с примитивными уравнениями.

6.1.1 Модель циркуляции Чёрного моря с улучшенным пространственным разрешением прибрежной зоны

Модель циркуляции Чёрного моря основана на системе примитивных уравнений, записанных в двухполусной ортогональной системе координат на сфере с учётом приближений гидростатики и Буссинеска. Уравнения модели записываются в симметризованной форме [35, 36], в качестве вертикальной координаты используется безразмерная переменная $\sigma \in [0,1]$:

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

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

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

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

$$D_t T = \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial \sigma} \mathbf{v}_T \frac{\partial T}{\partial \sigma} + D_T T + \frac{\partial R}{\partial \sigma} \quad (5)$$

$$D_t S = \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial \sigma} \mathbf{v}_S \frac{\partial S}{\partial \sigma} + D_S S \quad (6)$$

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

Здесь x и y – модельные долгота и широта соответственно; r_x, r_y – метрические коэффициенты, зависящие от расположения полюсов на сфере, $Z = H\sigma$,

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

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

D_t – оператор переноса, записанный в симметризованной форме:

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

u, v – горизонтальные скорости в σ -системе координат, ω – вертикальная скорость в σ -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} , ρ – отклонение плотности от $\bar{\rho} = \rho(Z)$, ν , ν_T , ν_S – коэффициенты вертикальной турбулентной вязкости и диффузии. Оператор турбулентной вязкости в (1), (2) представляет собой комбинацию операторов 2-го и 4-го порядков [36]. К системе уравнений (1) – (7) присоединяются краевые и начальные условия [36]. Численный алгоритм решения задачи основан на методе многокомпонентного расщепления [35, 37].

6.1.2 Постановка численного эксперимента

Для расчёта атмосферного воздействия используется банк данных ERA-Interim (http://data-portal.ecmwf.int/data/d/interim_daily/). Данные имеют пространственное разрешение $0.75^\circ \times 0.75^\circ$ по широте и долготе. По времени разрешение различное. Наиболее высокое разрешение 6 часов имеется для температуры поверхности океана, температуры точки росы, давления на уровне моря и скорости ветра на 10 м. Для данных по коротковолновой и длинноволновой радиациям используются массивы с разрешением 12 часов.

Для более детального описания прибрежной динамики модель циркуляции Чёрного моря реализована в сферической системе координат, в которой «полнос северного полушария» смещён на сушу в район Геленджика. Географические координаты нового полюса составляют 38.35° в.д. и 44.75° с.ш. Сеточное разрешение по новой долготе постоянно и равно 0.3° . Разрешение по новой широте является переменным и задаётся так, чтобы шаги сетки по широте в метрических единицах были равны шагам по долготе на данной широте. Увеличение разрешения около Геленджика связано с тем, что в этом районе организован подспутниковый полигон ИО РАН, предназначенный для измерения натуральных гидрофизических характеристик [30]. Полученные на полигоне данные наблюдений вместе с результатами модельных расчётов предполагается в дальнейшем использовать для изучения процессов в шельфово-склоновой зоне Чёрного моря.

Таким образом, разрешение сетки меняется от ~ 150 м в районе полигона ИОРАН до ~ 4.6 км в западной части Чёрного моря. Модельная область охватывает всю акваторию Чёрного моря, не включая Азовское море. По вертикали задаётся 20 неравномерно распределённых по глубине σ -уровней. Шаг по времени равен 80 С.

Данные по топографии Чёрного моря взяты из атласа GEBCO [38], которые доступны на сайте www.gebco.net. Они переведены из географической системы в модельную, сглажены и ограничены снизу значением 1.5 м. Данные для начальных и граничных условий по температуре и солёности взяты из [39].

Численный эксперимент представляет собой расчёт на 2011-2012 годы: 2011 год используется для разгона модели, а результаты за 2012 год анализируются. В качестве начальных условий принимались нулевые поля скорости и отклонения уровня моря и среднемесячные январские поля температуры и солёности.

В расчётах использовались следующие коэффициенты: коэффициент релаксации по температуре поверхности моря $\rightarrow 0.5 \times 10^{-4}$ см/с, релаксации по солёности на поверхности $\rightarrow 0.5 \times 10^{-4}$ см/с. Горизонтальная диффузия и вязкость 2-ого порядка задавались пропорционально шагу пространственной сетки с максимальным значением диффузии равным 3.0×10^5 см²/с, а вязкости – 1.0×10^6 см²/с. Вертикальный турбулентный обмен параметризовался согласно [40]. В зависимости от числа Ричардсона, коэффициенты вертикальной диффузии изменялись от 0.1 до 5 см²/с, а вязкости от 1.0 до 50 см²/с.

6.1.3 Воспроизведение крупномасштабной циркуляции

Результаты численного расчёта бароклинной модели показывают, что модель качественно верно воспроизводит основные особенности крупномасштабной циркуляции и мезомасштабные крупные вихри. В целом, результаты соответствуют прогностическим расчётам, выполненным ранее на равномерной сетке 4×4 км [36, 41]. Однако, имеются и заметные отличия.

Здесь можно отметить изменения крупномасштабной структуры течений в северо-восточной части моря, примыкающей к зоне высокого горизонтального разрешения. Во-первых, это – отклонение ОЧТ от берега в определённые периоды времени, например, в весенний период, в марте - середине апреля в окрестности точки (38° в.д., 43.5° с.ш.). Оно хорошо видно и в проекции модельного решения на грубую сетку (рис. 6.1). Во-вторых, формирование узкого противотечения на юг, и антициклона между ОЧТ и противотечением в зоне высокого разрешения. Именно этим противотечением, шириной $\approx 5-7$ км и не описываемым на сетке 4x4 км, вызвано отклонение ОЧТ. В-третьих, от зимнего к летнему сезону наблюдается постепенное разрушение общей структуры ОЧТ (рис. 6.2). На рис. 6.3 представлены поля уровня моря также за март и июль 2012 года по данным спутниковых измерений, доступным на сайте <http://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/sea-surface-height-products/regional/msla-black-sea.html#c10482>, которые подтверждают разницу в структуре ОЧТ в зимний и летний периоды.

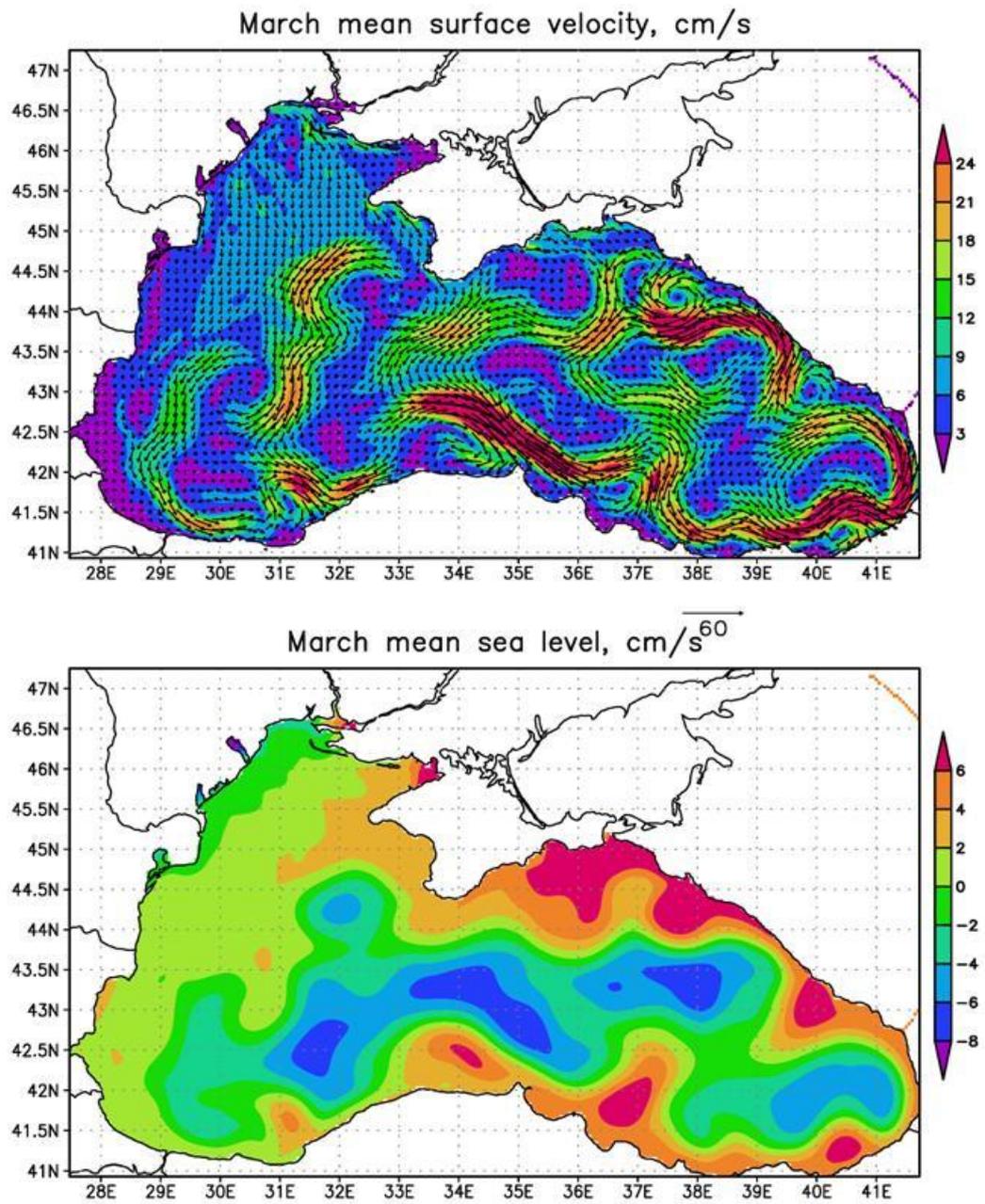


Рисунок 6.1 – Вверху: среднемартовская скорость течения на поверхности Чёрного моря, см/с. Внизу: среднемартовское поле уровня моря, см. 2012 год

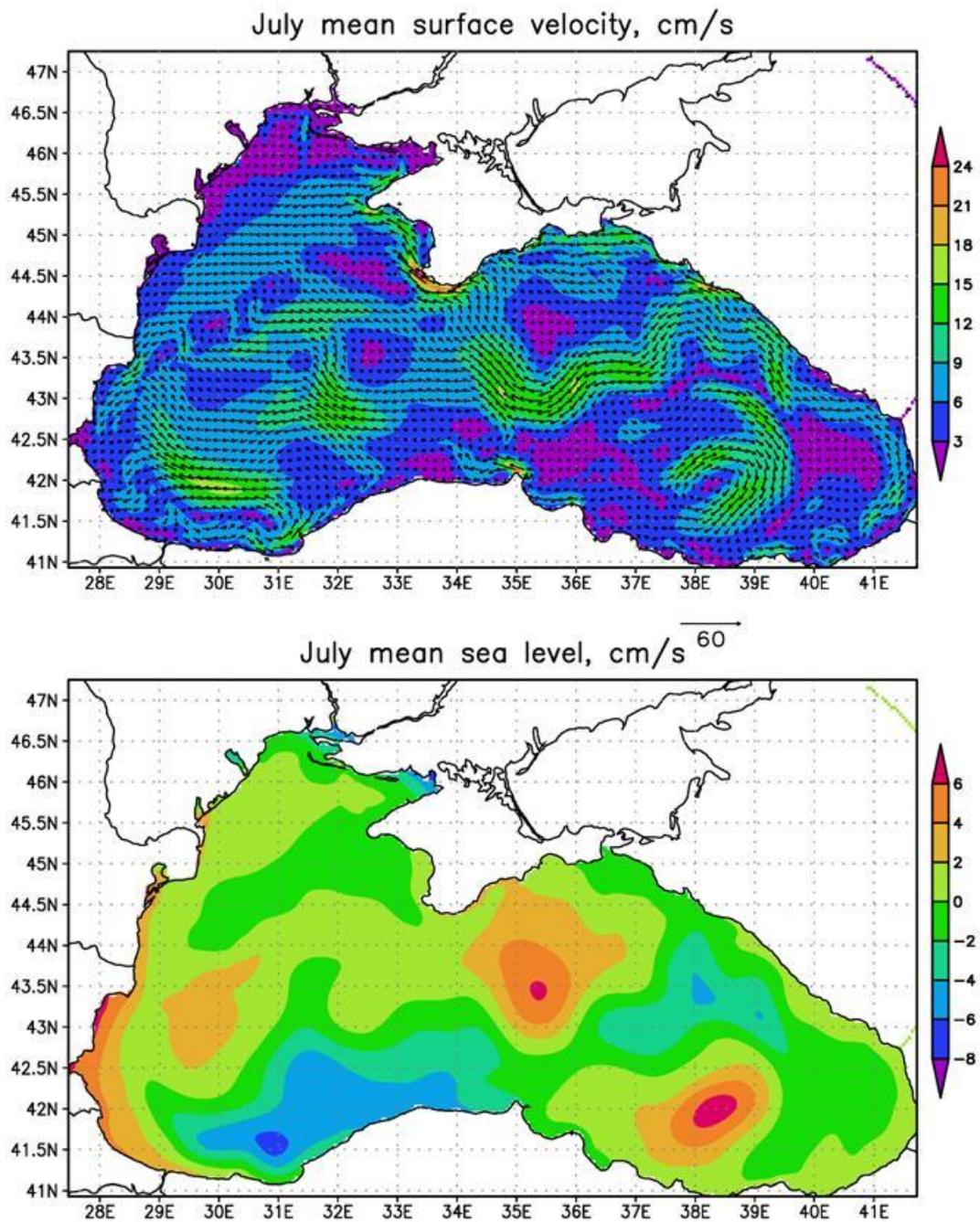


Рисунок 6.2 – Вверху: среднеиюльская скорость течения на поверхности Чёрного моря, см/с. Внизу: среднеиюльское поле уровня моря, см. 2012 год

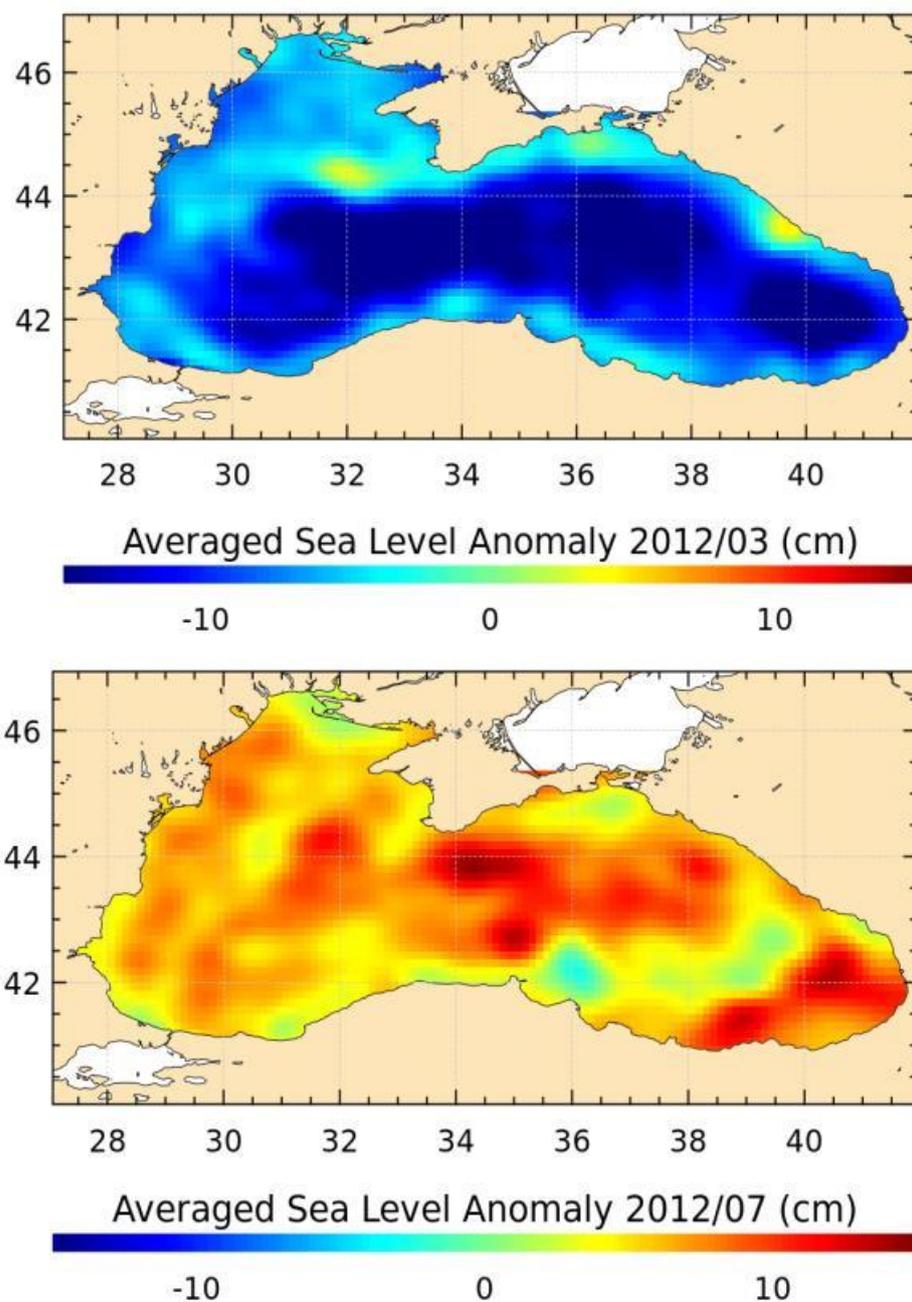


Рисунок 6.3 – Среднемесячный уровень моря по данным спутниковых измерений, см: вверху: март, внизу: июль 2012 года

На рис. 6.4 приведено поле среднемесячной температуры поверхности моря за май 2012 года по результатам расчётов и по данным измерений. Данные измерений получены с помощью спутниковых инфракрасных радиометров и статистической интерполяции и доступны на сайте http://marine.copernicus.eu/web/69-myocan-interactive-catalogue.php?option=com_csw&view=details&product_id=SST_BS_SST_L4_NRT_OBSERVATIONS_010_006. Можно видеть характерную пониженную температуру в юго-западной части моря и повышенную – в восточной. Нюансы могут быть вызваны использованием конкретных данных атмосферного воздействия, качество которых в дальнейшем возможно

повысить. Отдельные мелкомасштабные особенности в северо-восточной части, вероятно, связаны с повышенным разрешением.

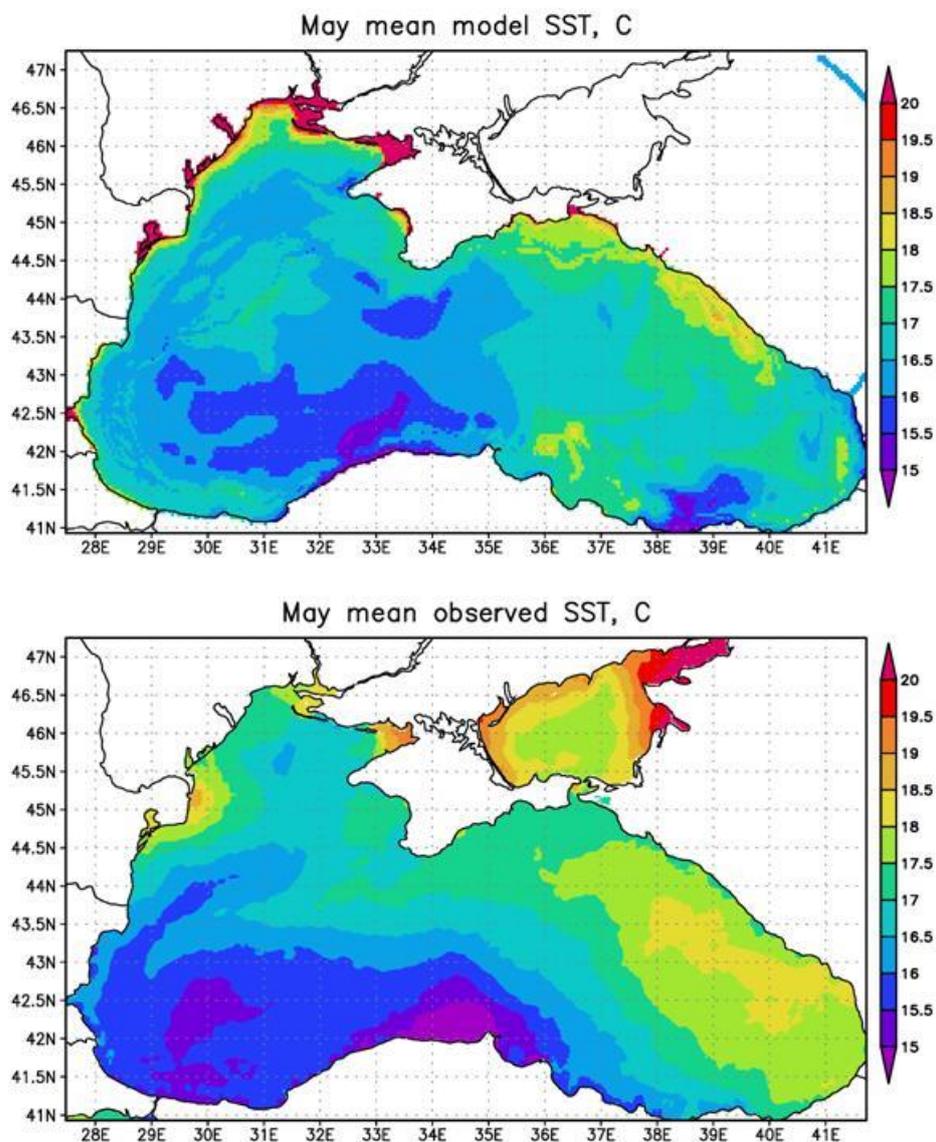


Рисунок 6.4 – Среднемайская температура на поверхности Чёрного моря за 2012 год, °С. Вверху – результаты расчётов, внизу – измерения

Таким образом, основные крупномасштабные особенности циркуляции Чёрного моря воспроизводятся адекватно. Ниже будут рассмотрены региональные особенности циркуляции в зоне повышенного разрешения.

Представим сравнение некоторых вертикальных профилей гидрофизических полей с данными измерений. Данные измерений предоставлены Южным отделением ИО РАН и получены при мониторинговых выходах МНИС Ашамба в поперечных к берегу разрезах от глубины 10м и до 1000-1500 м. На рис. 6.5–6.7 представлены вертикальные профили температуры и солёности для точек и моментов времени, указанных на рисунках. В целом

согласие модельных результатов с данными измерений присутствует. К недостаткам текущих модельных расчётов стоит отнести недостаточно хорошее воспроизведение холодного промежуточного слоя (ХПС), который в измерениях представлен хорошо. Тем не менее, дальнейшая настройка модельных параметров, таких как коэффициенты вертикального турбулентного обмена, способна решить эту проблему.

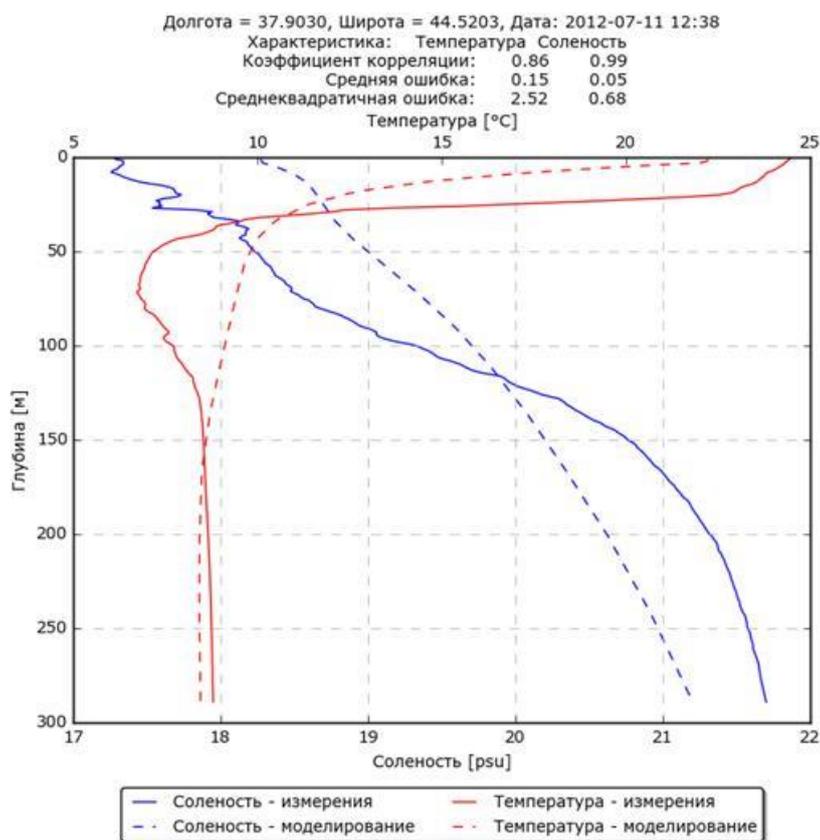


Рисунок 6.5 – профили температуры и солёности в точке 37.9030° в.д., 44.5203° с.ш. на момент времени 2012-07-11 12:38

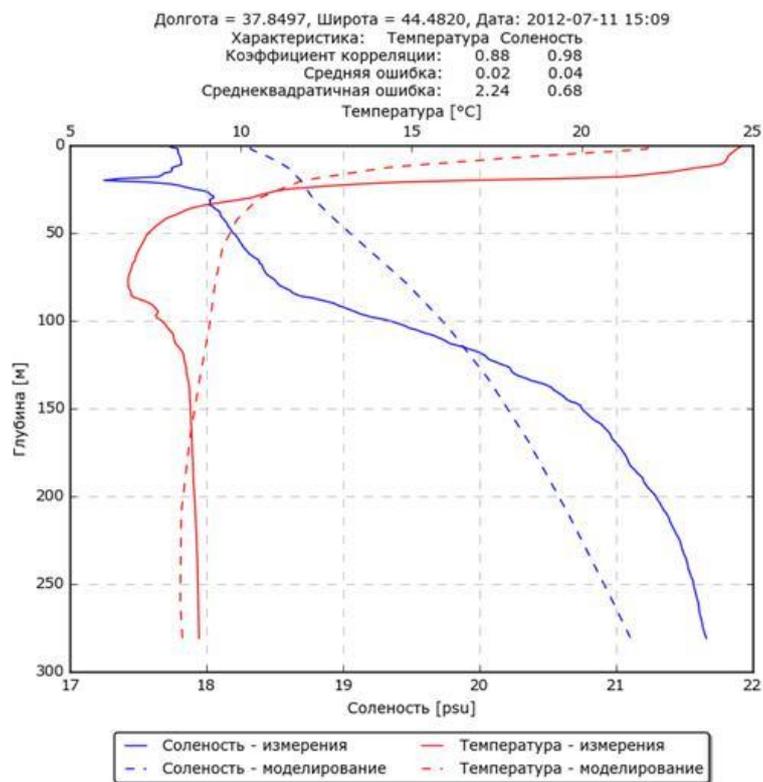


Рисунок 6.6 – профили температуры и солёности в точке 37.8497° в.д., 44.4820° с.ш. на момент времени 2012-07-11 15:09

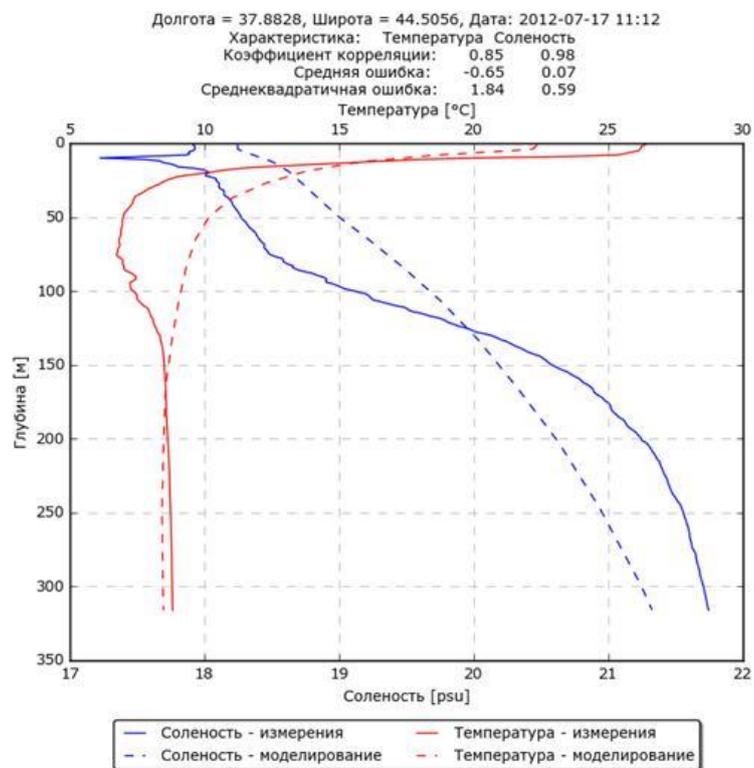


Рисунок 6.7 – профили температуры и солёности в точке 37.8828° в.д., 44.5056° с.ш. на момент времени 2012-07-11 11:12

На рис. 6.8-6.10 представлены профили скорости течений в точке 38.0447°в.д., 44.5436°с.ш. по результатам расчётов и данным измерений. Данные измерений предоставлены Южным отделением ИО РАН и получены в указанной точке с глубиной 25 м с помощью измерителя Nortek AWAC 1000 кГц. Из рисунков видно, что в модели хорошо воспроизводятся средние по глубине характеристики скорости, а вертикальная структура сильно сглажена. Как и в случае с ХПС, это может быть в дальнейшем исправлено путём подходящего подбора коэффициентов вертикального турбулентного обмена, в частности, их уменьшением. С другой стороны, изменчивость по вертикали в данных измерений представляется чересчур завышенной, поэтому в данном случае важно совместное использование численного моделирования и анализа данных наблюдений для получения правильного понимания вертикальной структуры гидрофизических полей.

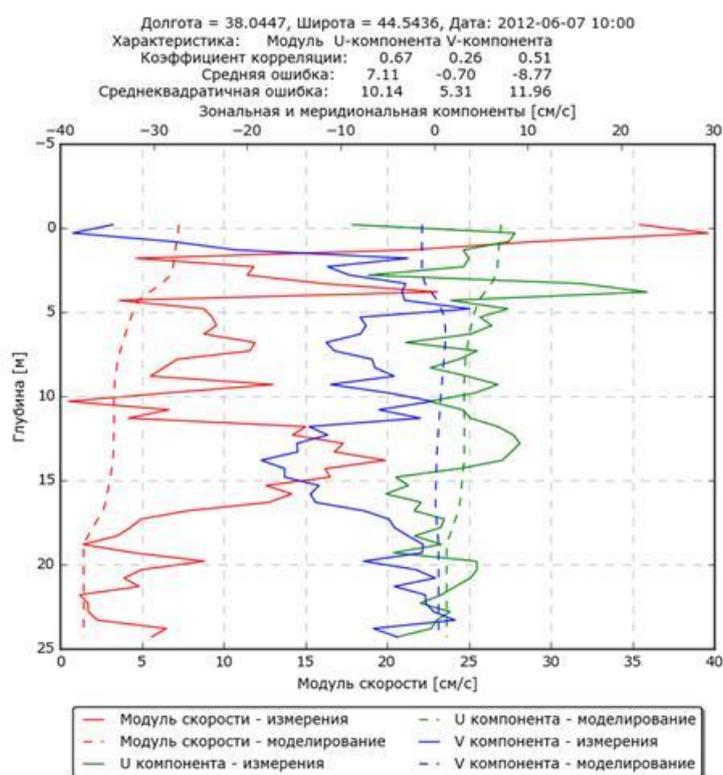


Рисунок 6.8 – профили скорости в точке 38.0447° в.д., 44.5436° с.ш. на момент времени 2012-06-07 10:00

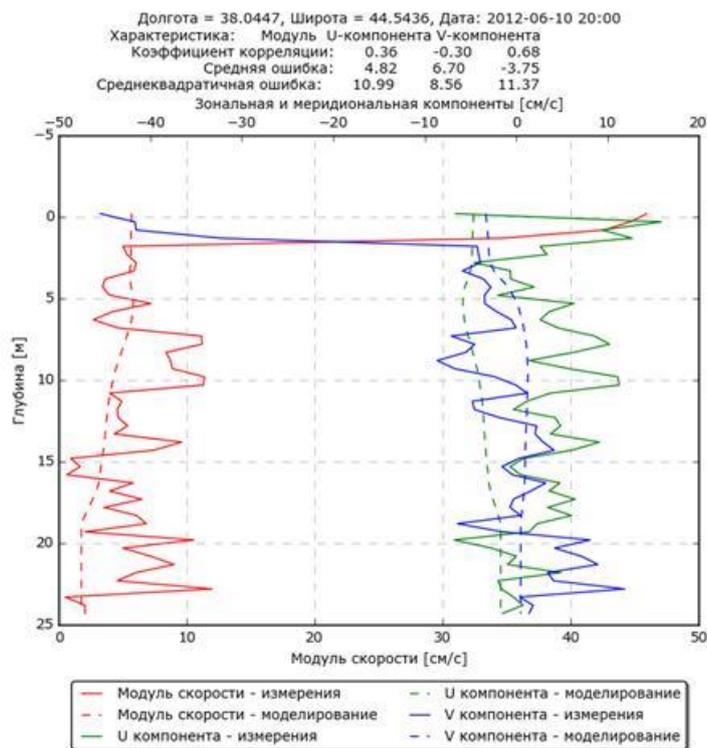


Рисунок 6.9 – профили скорости в точке 38.0447° в.д., 44.5436° с.ш. на момент времени 2012-06-10 20:00

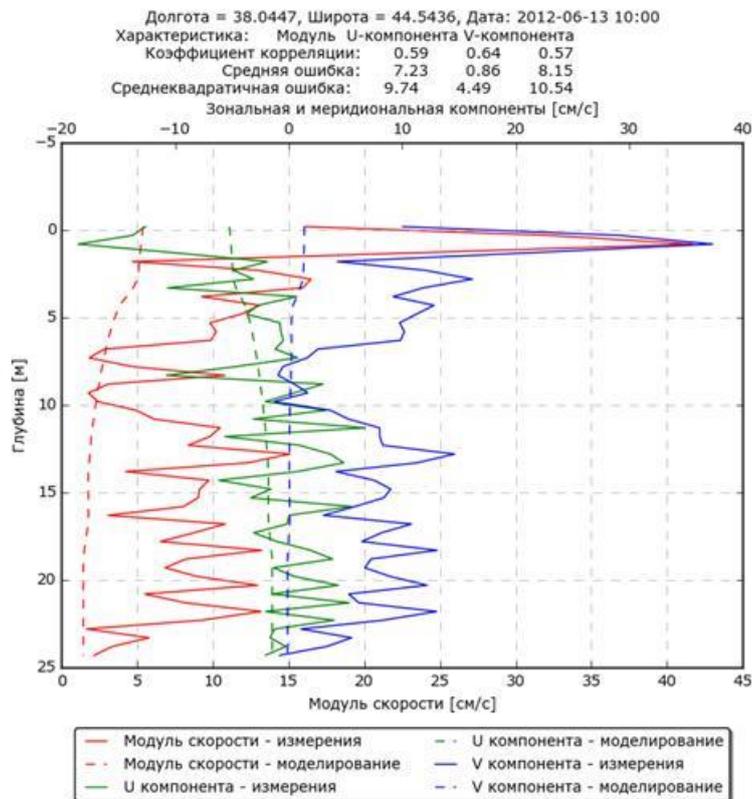


Рисунок 6.10 – профили скорости в точке 38.0447° в.д., 44.5436° с.ш. на момент времени 2012-06-13 10:00

6.1.4 Динамические процессы в прибрежной зоне высокого разрешения

Рассмотрим несколько эпизодов, демонстрирующих значительную активность и изменчивость прибрежной динамики в зоне высокого пространственного разрешения.

Одним из ярких примеров пространственно-временной изменчивости течений в зоне высокого разрешения является процесс изменения направления прибрежного потока и разрушение прибрежного противотечения. Основной поток ОЧТ в северо-восточной подобласти направлен на север, северо-запад. Он располагается над свалом глубин вдоль побережья и в моделях умеренного горизонтального разрешения с шагом сетки ≈ 4 км воспроизводится в виде единого потока. Численные расчеты с более высоким разрешением показывают, что течения в восточной части моря могут иметь более сложную структуру [17, 41]. Это демонстрируют и наши расчёты – наряду со средним потоком ОЧТ на северо-запад в разные моменты времени возникают локализованные течения в прибрежной зоне: как совпадающие по направлению с ОЧТ - направленные на север, так и прибрежные противотечения на юг. Они вызываются ветром, но имеют бароклинный характер, с ярко выраженным динамически активным верхним слоем порядка 10 – 20 м.

Типичным примером изменчивости прибрежной динамики является формирование противотечения и антициклона у Геленджика в июле 2012 г., рис. 6.11-6.15. 10 июля 00:00 в модельном решении наблюдается прибрежный поток на север, вихрей нет. 10 июля 00:00 формируется прибрежный антициклон и существует в течении 3-4 суток. Он увеличивается в размере и оттесняет основной поток ОЧТ в мористую часть.

Интересный процесс, иллюстрирующий быструю смену направления прибрежного течения, происходит в летний период. 20 июля 23:00 наблюдается прибрежное течение на юг (рис. 6.16). ОЧТ смещено в мористую зону, между разнонаправленными потоками располагаются антициклоны. В течение полутора суток прибрежное течение слабеет, разрушается и меняет направление на северное (рис. 6.17).

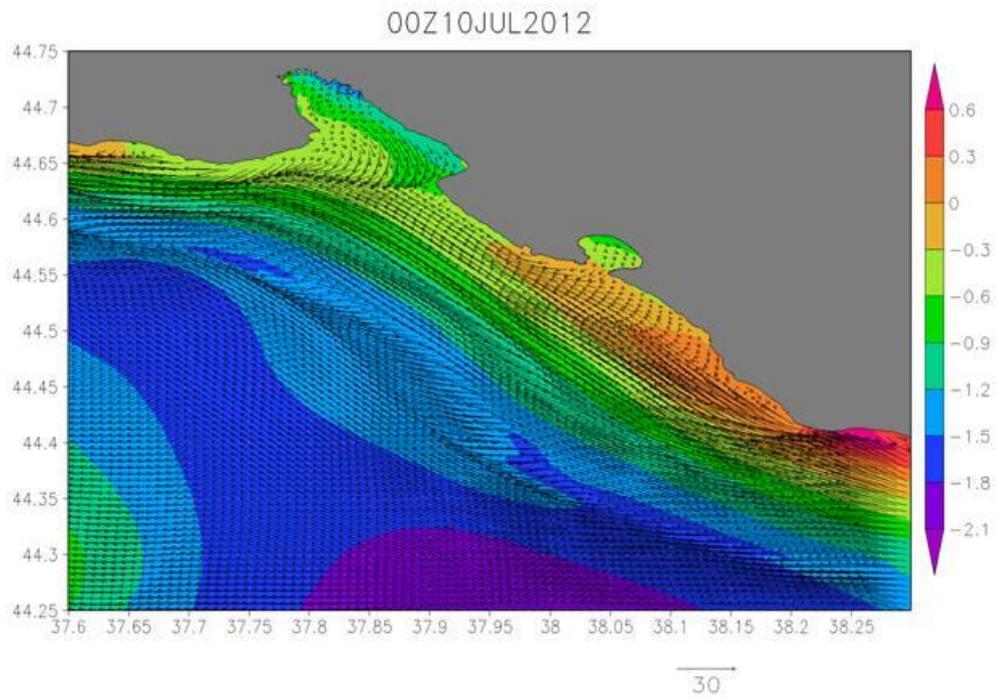


Рисунок 6.11 – Уровень моря и скорости течений на поверхности на 00:00 10 июля 2012 г. Прибрежное течение на северо-запад, вихрей нет

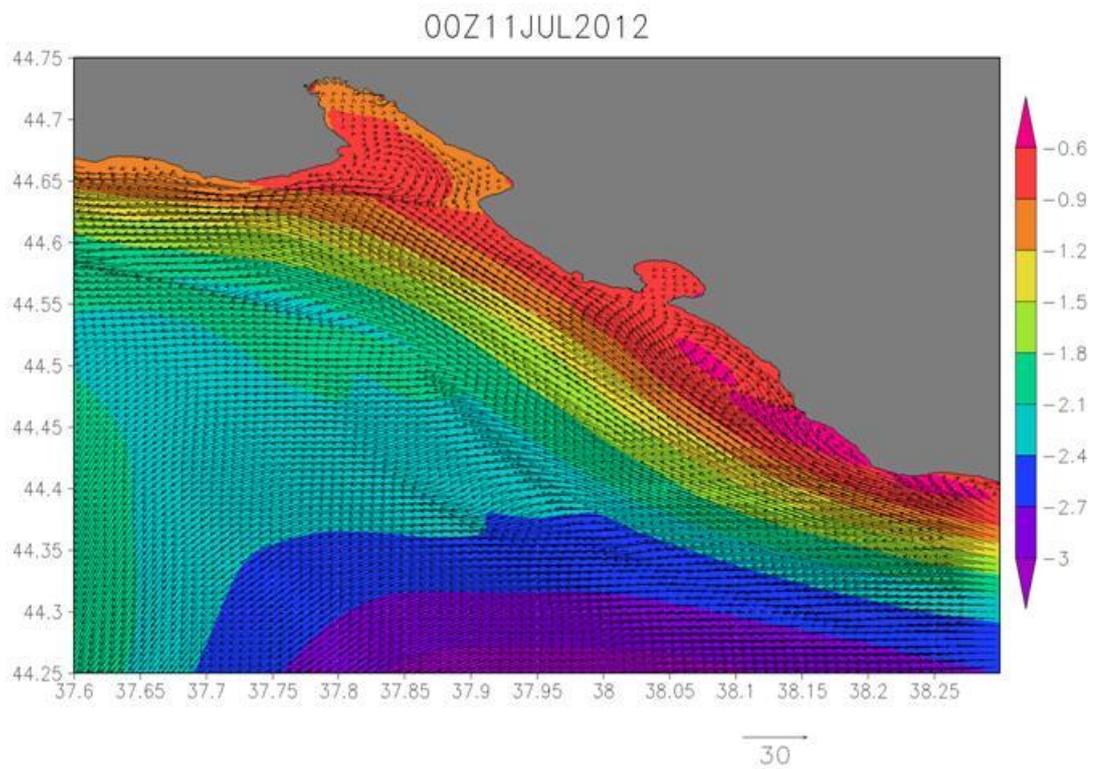


Рисунок 6.12 – Уровень моря и скорости течений на поверхности на 00:00 11 июля 2012 г. Формирование противотечения и бароклинного антициклона

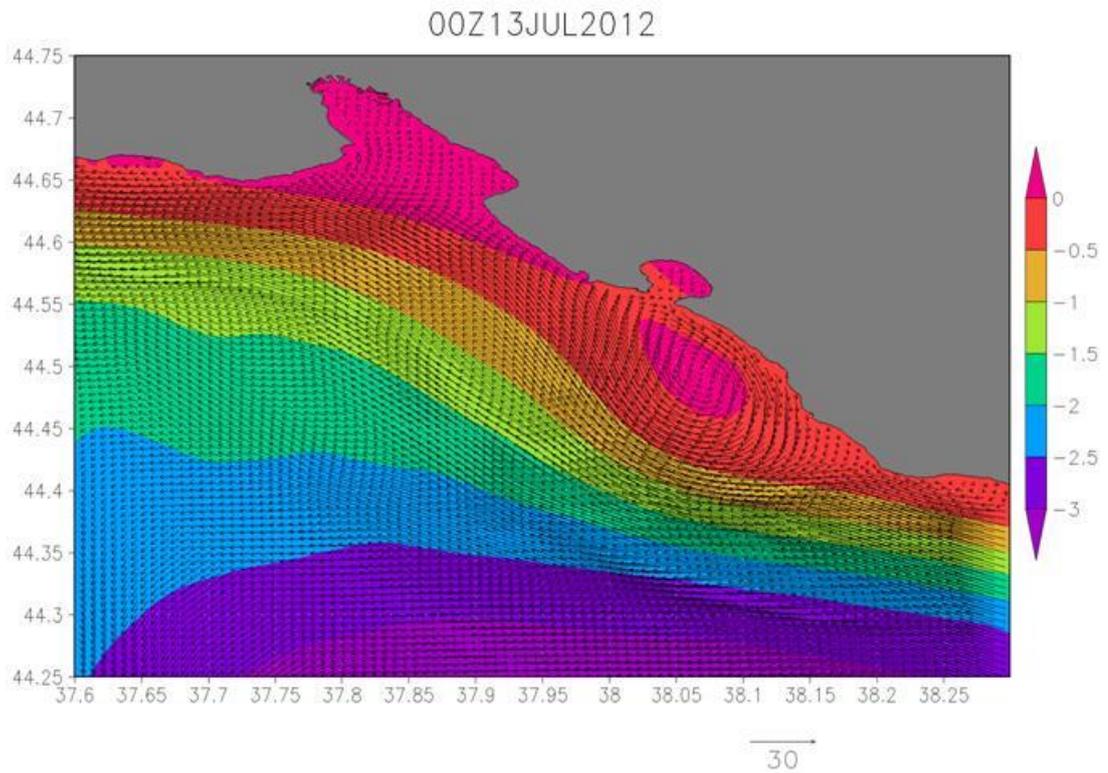


Рисунок 6.13 – Уровень моря и скорости течений на поверхности на 00:00 13 июля 2012 г. Формирование и расширение бароклинного антициклона

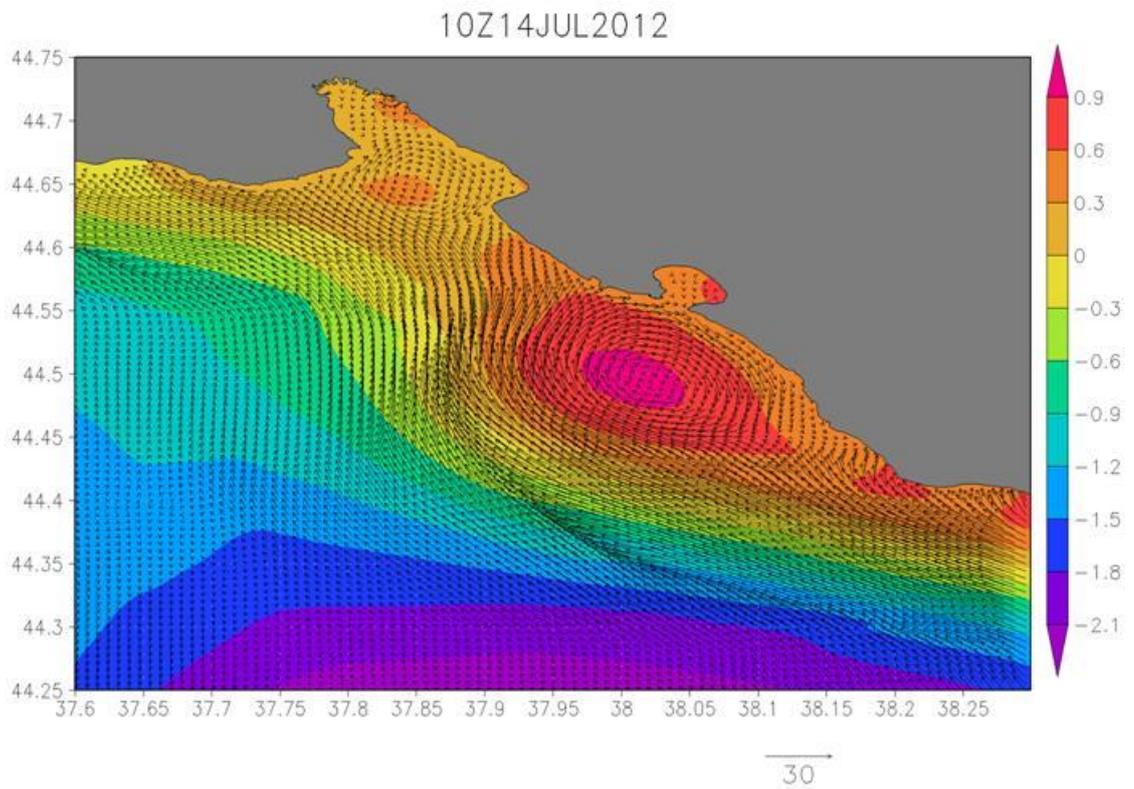


Рисунок 6.14 – Уровень моря и скорости течений на поверхности на 10:00 14 июля 2012 г. Ослабление течений, расширение вихрей

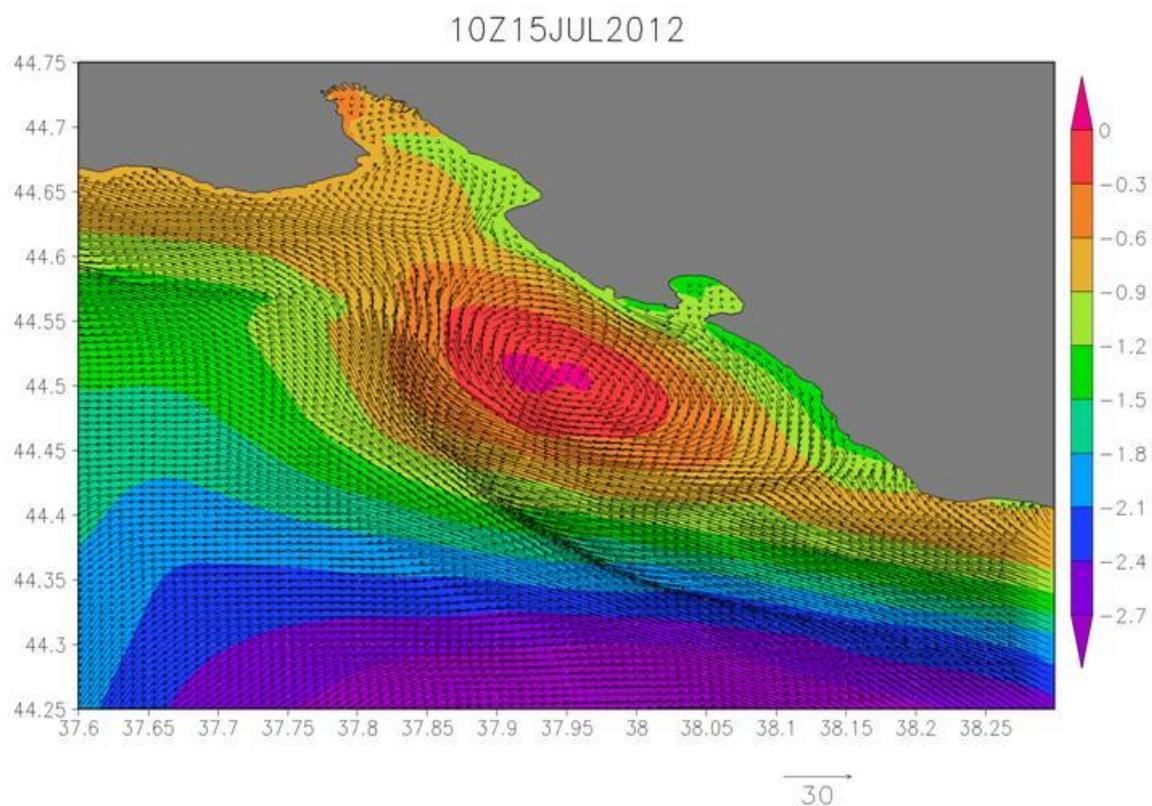


Рисунок 6.15 – Уровень моря и скорости течений на поверхности на 10:00 15 июля 2012 г. Формирование потока на север, вихри у берега

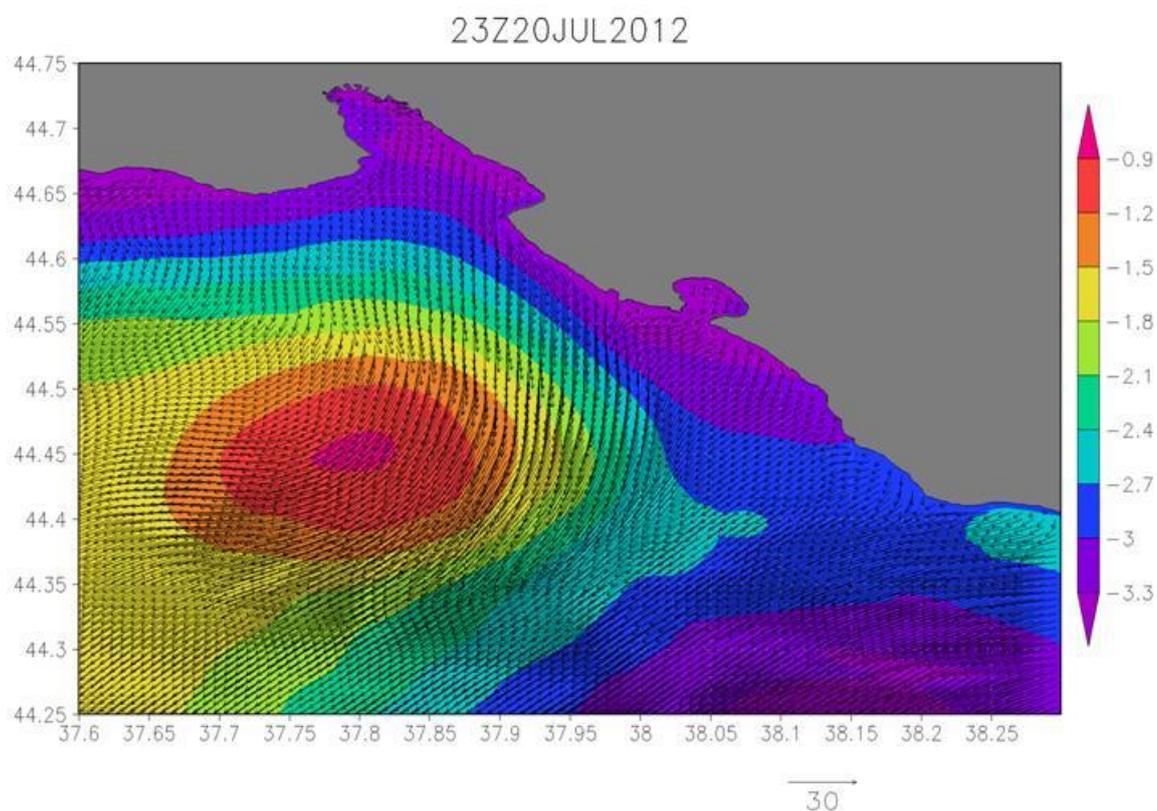


Рисунок 6.16 – Уровень моря и скорости течений на поверхности на 23:00 20 июля 2012 г. Прибрежное течение на юг, антициклон на внешней стороне

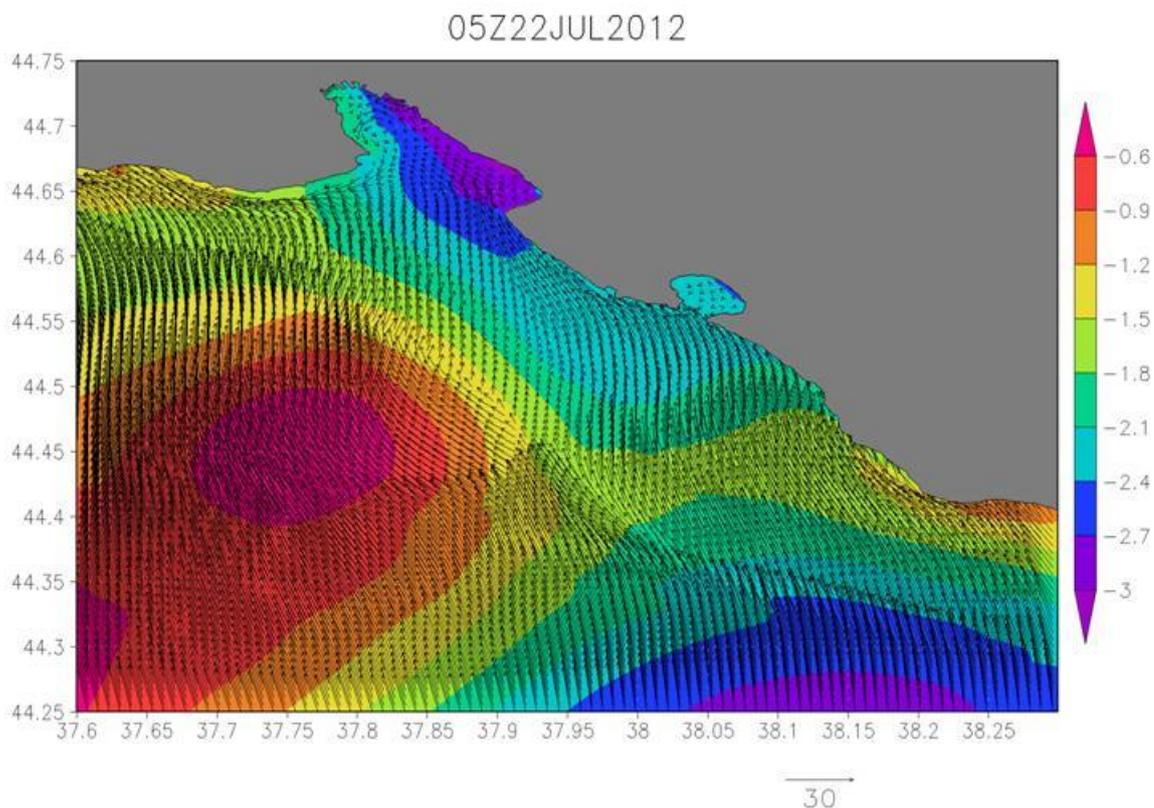


Рисунок 6.17 – Уровень моря и скорости течений на поверхности на 05:00 22 июля 2012 г. Течение на север

Выводы

1) Разработана основанная на примитивных уравнениях численная модель циркуляции Черного моря с улучшенным пространственным разрешением прибрежной зоны. Уравнения модели формулируются в двухполюсной ортогональной системе координат с произвольным расположением полюсов и сигма - координатой по вертикали. Численный алгоритм решения задачи основан на методе многокомпонентного расщепления. Повышение горизонтального разрешения достигается за счёт смещения полюса в окрестность выделяемой подобласти. Это позволяет вместе с крупномасштабной морской циркуляцией моделировать вихревые режимы прибрежной динамики в рамках «сквозного счета».

2) Проведены численные расчёты полей течений, уровня моря, температуры и солёности в локально вихревом режиме на сетке с переменным шагом. Северный координатный полюс смещён в окрестность г. Геленджик, шаг сетки изменяется от 150 м в прибрежной зоне до 4,6 км в основной акватории. Расчёты проведены при реалистичном атмосферном воздействии за 2011-2012 гг.

3) Модель успешно воспроизводит крупномасштабную циркуляцию Черного моря, а также мезо- и субмезомасштабную изменчивость прибрежных течений. Расчёты демонстрируют активность и изменчивость бароклинной динамики в зоне высокого пространственного разрешения. Наблюдаются значительные изменения структуры струйных прибрежных течений: отход ОЧТ от берега, разбиение его на отдельные струи, формирование прибрежных противотечений, циклональных и антициклональных вихревых образований в прибрежной зоне и между отдельными струями. Сравнение результатов расчётов с данными измерений и спутниковой информацией показывает хорошее соответствие измерений и наблюдений. Тем не менее, для получения более высокого соответствия требуются дальнейшие исследования, такие как настройка коэффициентов вертикального турбулентного обмена и использование данных атмосферного воздействия с более высоким пространственно-временным разрешением.

6.2. Численные расчеты на основе модели MIKE

6.2.1 Решение задачи численных расчетов

Преыдушие исследования на гидрофизическом полигоне ИО РАН района Геленджика показали, что основным элементом динамики прибрежной шельфовой зоны Черного моря являются субмезомасштабные вихревые структуры, с размерами от 1 до 10 км и характерным временным масштабом от 10 часов до 3-4 суток [45]. Для корректного моделирования указанных особенностей динамики размер расчетных ячеек должен быть существенно меньше 1 км. Если учитывать эффекты волнового взаимодействия размеры ячеек не должны превышать первых десятков метров (половины длины волны).

Уменьшение размера ячеек из условий устойчивости численной схемы ведет к уменьшению расчетного временного интервала, и, как следствие, к росту машинного времени решения задач. Для условий Черного моря необходимое уменьшение размера ячеек приводит к тому, что машинное время моделирования превосходит время реального развития процессов.

Возможно два подхода к решению проблемы.

Первый – использование неравномерных расчетных сеток (со сгущением в области ответственного моделирования). Преимущества данного подхода заключаются в том, что нет необходимости решать проблемы с граничными условиями – расчетной областью является все Черное море с жесткими границами в виде береговой линии. С другой стороны метод ограничивает минимальный размер ячеек в области сгущения сетки. Расчетный интервал всей модели определяется по минимальному размеру расчетной сетки (условие Куранта). Таким образом, проблема с машинным временем решения задач решается лишь частично.

Второй – моделирование всего бассейна (Черного моря) на укрупненной сетке с использованием результатов расчетов в качестве граничных условий для выделенного локального участка с мелкомасштабной расчетной сеткой. Преимущества данного подхода заключается в том, что можно задавать любой минимальный размер расчетной сетки локального участка. Проблемы подхода – корректное определение граничных условий на жидких границах.

Работы по моделированию велись в двух направлениях:

- 1) Создание собственной модели циркуляции вод Черного моря с улучшенным разрешением у побережья Геленджика в районе полигона ИОРАН.
- 2) Адаптация программных комплексов зарубежных разработок к условиям Черного моря с выделением локального участка побережья в районе полигона.

6.2.2 Результаты адаптации программного комплекса MIKE к условиям Геленджикского побережья в районе полигона ИОРАН

Описание программного комплекса MIKE

Для решения поставленных в проекте задач использованы вычислительные модели, которые входят в состав расчетного комплекса DHI MIKE Датского Гидравлического института. На текущем этапе работ численные расчеты выполнены на основе трехмерной гидродинамической модели, а также объединенной гидродинамической и спектральной волновой модели, позволяющей учитывать эффекты взаимодействия волнения и течений. Объединение гидродинамической и спектральной волновой моделей требует значительных вычислительных ресурсов. Поэтому поля волнения в работе учитывались параметрически с использованием базы данных по ветровому волнению на акватории Черного и Азовского морей, рассчитанных отдельно за период с 1990 по 2014 года.

Трехмерная гидродинамическая модель основана на численном решении уравнений Навье-Стокса. Программа позволяет рассчитывать трехмерные поля течений, а также распределения температуры и солености в зависимости от внешнего воздействия и выбранных граничных условий. Модель позволяет учитывать эффекты следующего внешнего воздействия:

- ветровой форсинг;
- приливной потенциал;
- потоки влаги (речной сток, испарение-осадки, обмен через проливы и пр.);
- потоки тепла (солнечная радиация, адвекция и пр.).

Базовые уравнения *спектральной волновой модели* выведены из условий баланса волновой энергии и позволяют описывать процессы нарастания, затухания и трансформации в прибрежной зоне ветрового волнения. Модель учитывает следующие эффекты:

- трансформацию с учетом батиметрических особенностей;
- рефракцию и дифракцию (параметрически) волн;
- эффекты локального ветрового воздействия;
- диссипацию энергии вследствие донного трения и обрушения;
- взаимодействия волн и течений.

Методики

Основная проблема использования результатов моделирования всего бассейна для локальных моделей относительно небольших морских акваторий – задание корректных

гидродинамических условий на внешних проницаемых границах. Необходимо понимать, что условия на жидких границах характеризуются изменчивостью как по пространству (в том числе и по вертикали), так и по времени. В DHI MIKE реализована отдельная процедура наложения (mapping) граничных условий, позволяющая интерполировать входные данные в расчетные узлы локальной сетки. С помощью внутренних процедур DHI MIKE формируются три файла, задающие граничные условия для локальной модели. Каждый файл содержит информацию об уровне моря, расходах и скоростях течений за расчетный период с заданной дискретностью по времени, также по вертикальным разрезам, определяющим границы области. Линейные размеры открытых участков локальной модели соответствуют горизонтальным размерам вырезаемых профилей общей модели.

Таким образом, задача моделирования гидродинамики локального участка полигона ИО РАН решалась в два этапа:

1) Воспроизведение крупномасштабной гидродинамики Черного моря с целью получения граничных условий для более детального исследования локальных особенностей динамики прибрежных вод на основе **общей** модели.

2) Численное моделирование динамики прибрежных вод в пределах выбранного полигона по **локальной** вычислительной модели.

Ключевыми элементами любой гидродинамической модели являются: исходная батиметрия, начальные и граничные условия, физические допущения. В предположении, что на динамику исследуемого участка (как элемент крупномасштабной динамики Черного моря) может оказывать влияние водообмен с Азовским морем, для численных экспериментов выбрана объединенная модель Черного и Азовского морей. Водообмен через пролив Босфор в настоящей работе не учитывался.

На основе батиметрической карты Черного и Азовского морей методом триангуляции для общей модели построена неравномерная расчетная сетка со сгущением в районе шельфа (рис. 6.18a). Сетка состоит из 15 тысяч элементов. Локальная модель охватывает часть северо-кавказского шельфа в районе гидрополигона г. Геленджика (рис. 6.18b, 6.19). Горизонтальная расчетная сетка при этом состоит из 8 тысяч элементов. Ранее отмечалось, что минимальный горизонтальный масштаб сетки представляет собой компромисс между требованиями пространственного разрешения и приемлемым временем счета. Учитывая, что возможность разрешения гидродинамических особенностей напрямую зависит от линейных размеров элементов расчетной сетки, характерный линейный размер расчетного элемента сетки в прибрежной зоне модели Черного моря составляет 3 км. Для локальной модели характерные размеры расчетных элементов выбраны ~500 м мористой

части участка и ~50 м для прибрежной шельфовой зоны (область ответственного моделирования).

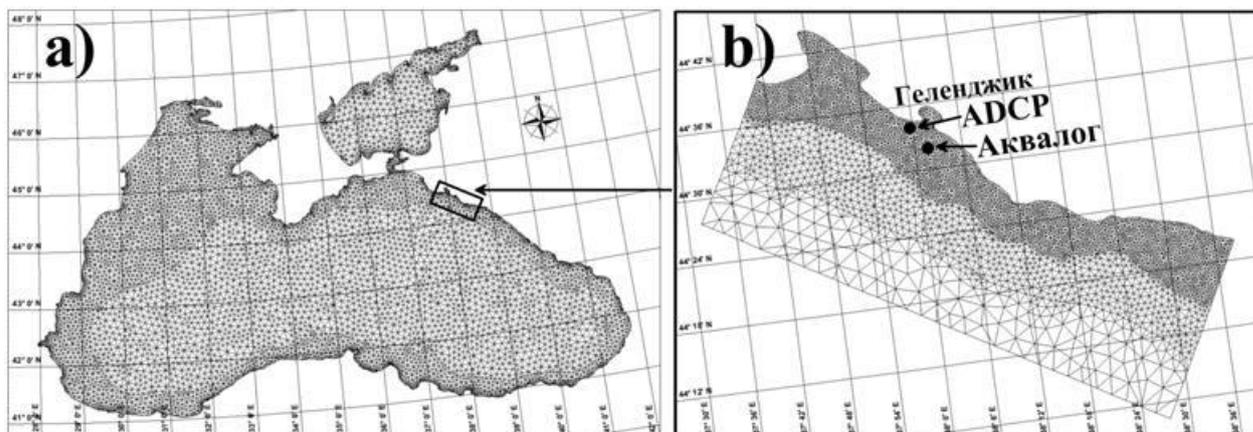


Рисунок 6.18 – Расчетные сетки Черного моря и локального участка гидрофизического полигона

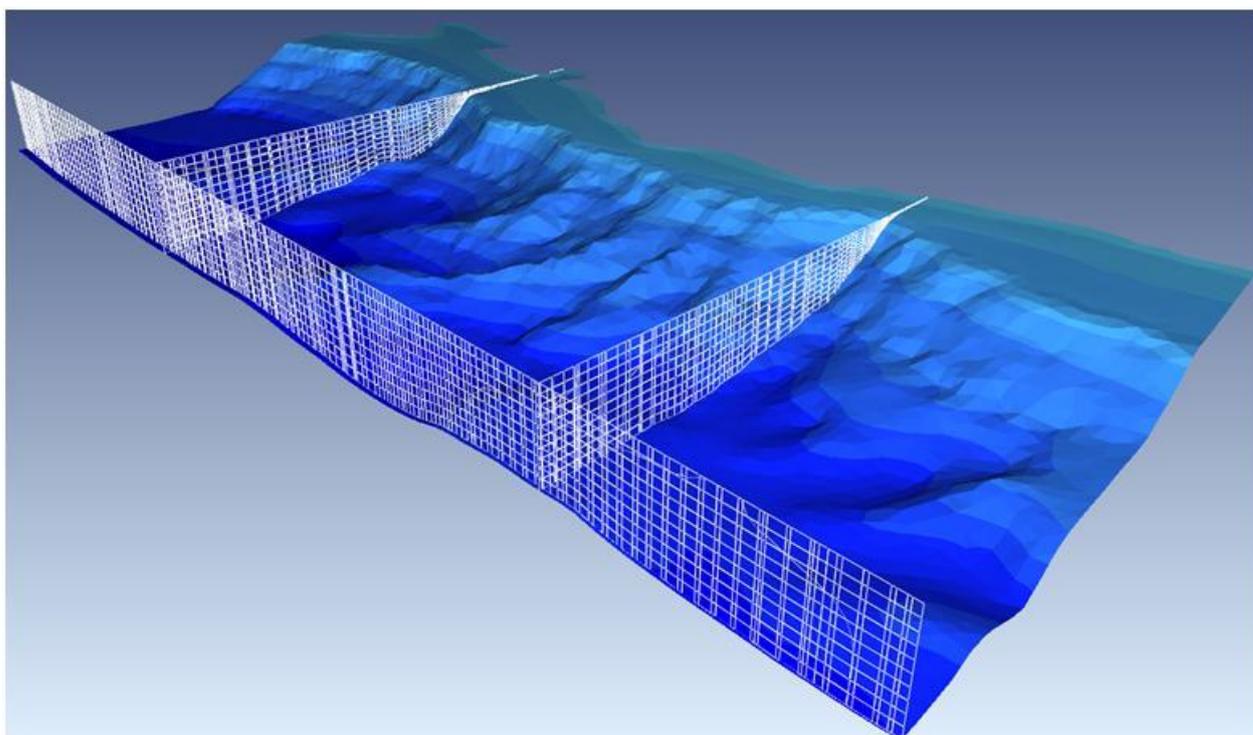


Рисунок 6.19 – 3D представление батиметрии с расчетной сеткой на жидких границах локальной модели района полигона

В вертикальном плане используется σ -координатная сетка: для модели Черного моря 20-слойная, для локальной модели – 10-слойная (рис. 6.20).

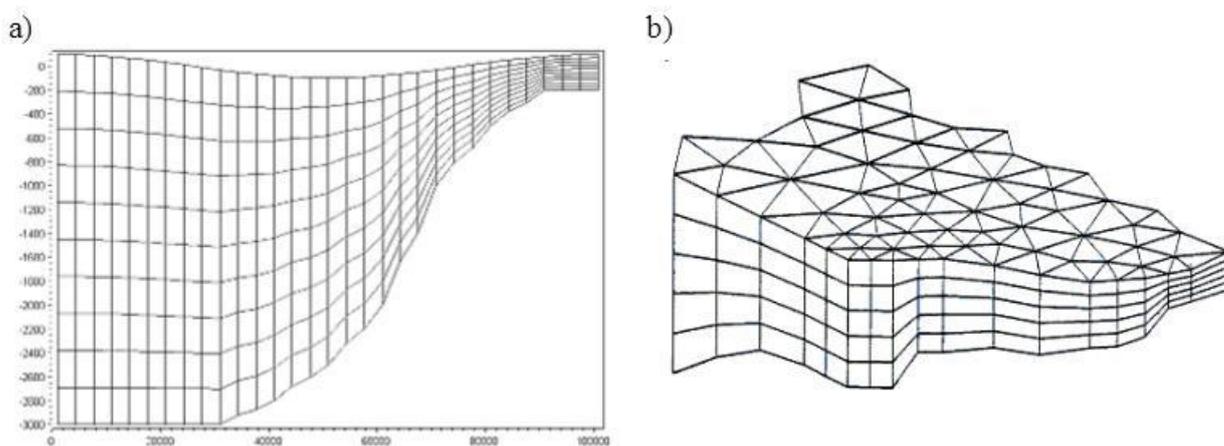


Рисунок 6.20 – а) σ -координатная сетка для локальной модели участка гидрофизического полигона. б) триангуляционная схема расчетной области

Физические основы моделей

В модели всего Черного моря учитываются: бароклинность (в упрощенном виде; для расчетных периодов принимаются сезонные климатические поля температуры и солености), сила Кориолиса, реальные поля ветра, горизонтальный турбулентный обмен (в формулировке Смагоринского), вертикальный обмен (как функция диссипации турбулентной кинетической энергии). Не учитываются: влаго- и теплообмен на границе море-атмосфера, пресный сток рек, водообмен через Босфор. Локальная вычислительная модель для упрощения принята баротропной. Общая модель используется лишь как инструмент получения граничных условий для локальной, между ними нет прямого интерфейса и отсутствует необходимость сопряжения границ по расчетным элементам.

Заметим, что физические процессы прибрежной, шельфо-склоновой зоны моря в той или иной степени являются продуктом глобальных (по отношению к ним), крупномасштабных явлений. Тепло- и массообмен через поверхность, поперечная неравномерность ветра, формирование глобальной циркуляции и т.п. происходят на масштабах моря. Поэтому, для моделирования динамики Черного моря используется более сложная модель с большим количеством определяющих физических факторов.

Результаты локальной модели – отклик прибрежной динамической системы на специфику внешних течений на границах расчетной области, особенностей местной батиметрии, изрезанности линии берега. Кроме того, на текущем этапе исследований не ставилась задача учета всех физических механизмов, участвующих в формировании полей течений локальной области. Главный результат этапа – разработана модель, которая в целом адекватно описывает физические процессы прибрежной шельфовой зоны моря, что в дальнейшем позволит включать/выключать внешние факторы и ставить корректные с физической точки зрения численные эксперименты.

Как показали предварительные численные эксперименты, жидкие боковые границы всегда влияют на корректность расчетов внутри области (особенно, в областях, непосредственно примыкающих к границам). Предполагается возможный вариант решения проблемы – пространственное расширение локальной модели, за счет чего: а) минимизируется влияние боковых границ; б) появится возможность экспериментировать с параметрами модели без особого риска проявлений неустойчивости модели.

Исходные данные

Источники внешнего воздействия получены на основании данных, предоставляемые Европейским центром среднесрочных прогнозов (<http://apps.ecmwf.int>). Анализ ERA-Interim доступен с 1979 года по текущее время и содержит более ста параметров, характеризующих состояние атмосферы и океана (рис. 6.21).

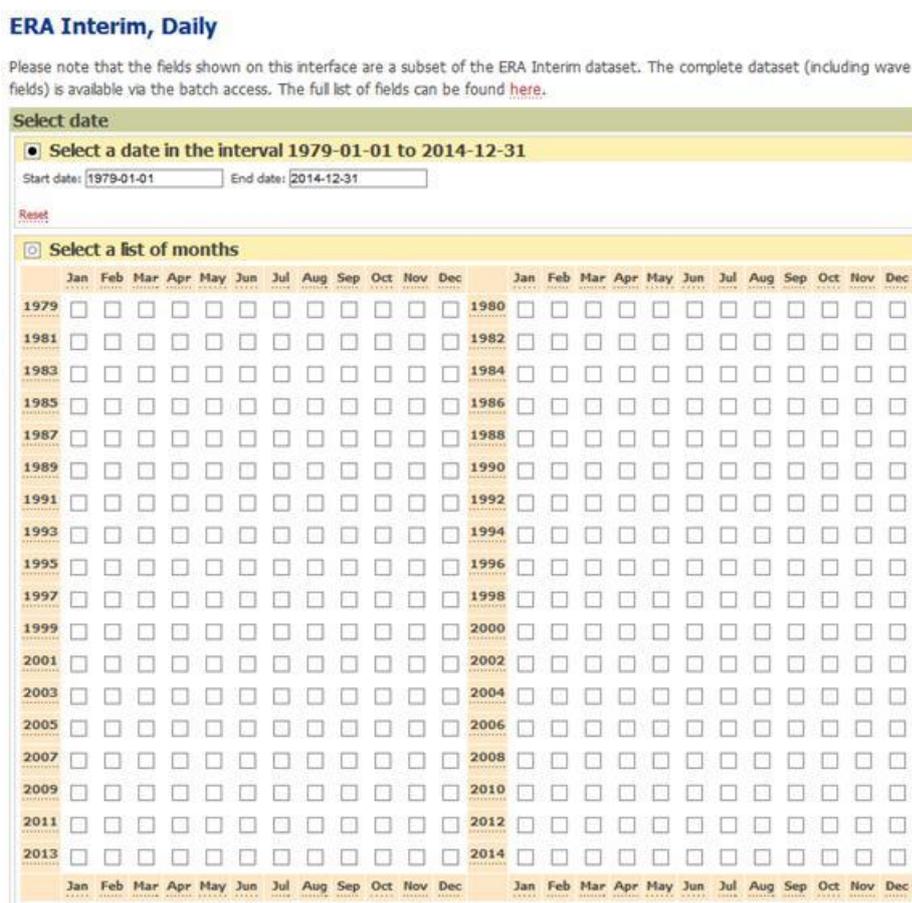


Рисунок 6.21 – Диалоговое окно ERA-Interim с базой данных с 1979 по 2014 гг.

Пространственное разрешение данных составляет 0.25 градуса, что дает в итоговом гриде для бассейна Черного и Азовского морей 61 точку по долготе и 29 точек по широте. Шаг по времени составляет 3 часа. Этого вполне достаточно для корректного воспроизведения синоптической обстановки.

Основным параметром массива данных глобального атмосферного реанализа ERA-Interim, который используется в модельных расчетах, является приземное давление (рис. 6.22). По массивам приземного давления определяется градиентный ветер и далее путем коррекции рассчитываются горизонтальные компоненты стандартного ветра на высоте 10 м над уровнем моря (U_{10} , V_{10} , рис. 6.23, рис. 6.24). Таким образом, данные ERA-Interim позволяют сформировать поля атмосферного давления и компонент скорости ветра над заданной акваторией с временным шагом 3 часа.

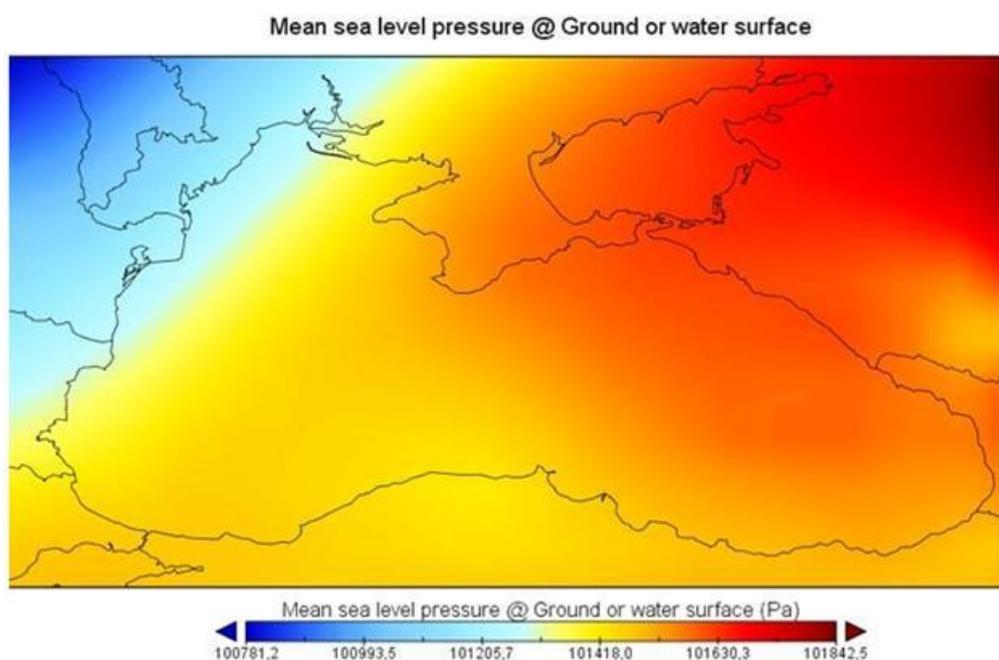


Рисунок 6.22 Пример выборки из массива данных ERA-Interim. Карта приземного (приводного) давления.

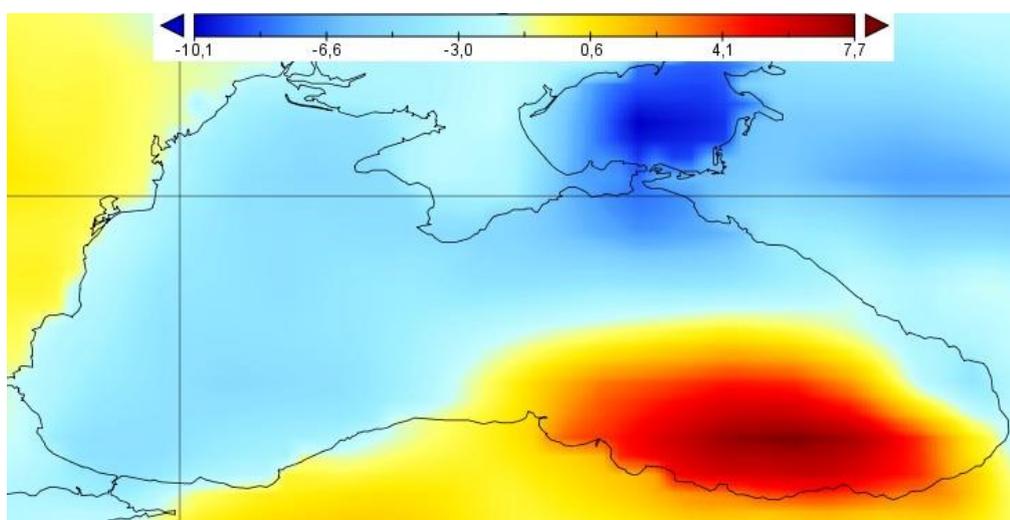


Рисунок 6.23 – Пример выборки из массива данных ERA-Interim. U_{10} -компонента скорости ветра, м/с

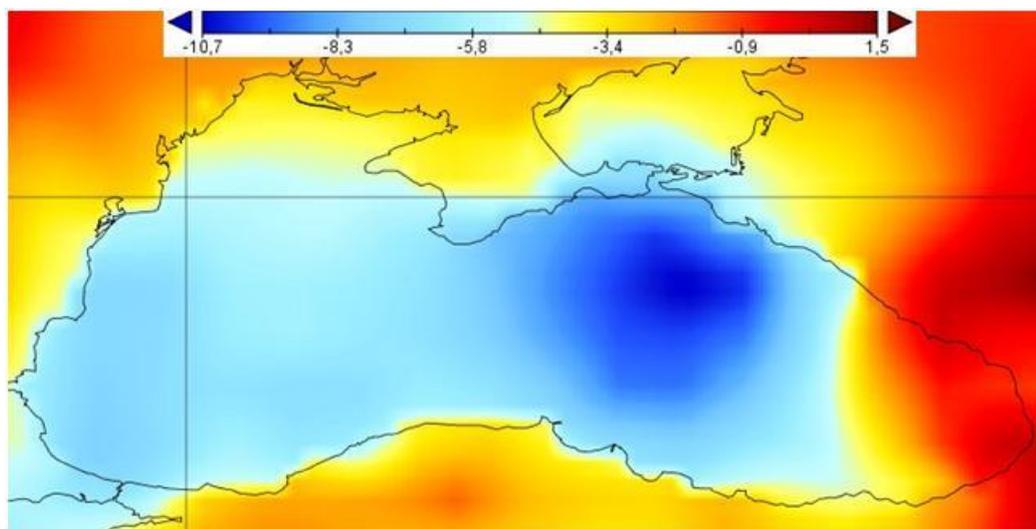


Рисунок 6.24 – Пример выборки из массива данных ERA-Interim. V_{10} -компонета скорости ветра, м/с

Верификация локальной гидродинамической модели производилась по материалам натуральных наблюдений, выполненных зондом-профилографом «Аквалог» и акустическим доплеровским измерителем скорости течения ADCP WH-600, входящими в состав подспутникового полигона (рис. 6.18б). Зонд-профилограф «Аквалог» расположен в створе Толстого мыса Геленджикской бухты на расстоянии 9 км от берега (глубина 270 м). ADCP WH-600 входит в состав донной станции, расположенной на траверзе Голубой бухты на расстоянии 900 м от берега (глубина 22 м). Данные ADCP WH-600 получены с дискретностью 1 час, Аквалог – 6 часов.

Моделирование гидродинамики прибрежной зоны Черного моря проведено за три отдельных месяца: сентябрь 2008-го, январь 2011-го и март 2013-го. Месячный период численных экспериментов в основном обоснован машинным временем расчетов (для справки – расчет за календарный месяц на персональном компьютере с процессором Intel i7 по представленной модели Черного моря составляет 9 часов, по локальной модели – 7 часов, общее машинное время расчетов – 16 часов). При “нулевых” начальных значениях гидрофизических полей приспособление модели к внешним факторам происходит за 3-5 суток. Таким образом, месячного периода достаточно для исследования основных закономерностей динамики прибрежной шельфовой зоны, для которой определяющими являются динамические процессы с характерными временными масштабами от часов до нескольких суток.

Выбор указанных периодов обусловлен тем, что за январь 2011 г и март 2013 г получены одновременные измерения ADCP WH-600 и Аквалог. В общем случае периоды непрерывных наблюдений на указанных измерительных комплексах различаются. Это

связано с необходимостью проведения профилактических работ, периоды и сроки которых совпадают не всегда.

В сентябре 2008 г была выполнена буксировка ADCP, по результатам которой был выявлен прибрежный антициклонический вихрь [44]. Представлял большой интерес вопрос способности разработанной модели (в принятых допущениях общей модели Черного моря, в допущениях локальной модели) воспроизвести измеренный в натуральных условиях пространственный гидродинамический объект.

Результаты расчетов

В соответствие с представленной ранее схемой проведения численного эксперимента, на начальном этапе выполнены расчеты по общей модели Черного моря. Получен массив трехмерных течений за выбранные расчетные периоды (3 массива по 1 месяцу) с дискретностью интервала численной схемы. С помощью внутренних процедур DHI MIKE для каждого периода сформировано три файла, задающие граничные условия для локальной модели. Каждый файл содержит информацию об уровне моря, расходах и скоростях течений за расчетный месяц с дискретностью в 3 часа по вертикальным разрезам, определяющим границы области. Линейные размеры открытых участков локальной модели соответствуют горизонтальным размерам вырезаемых профилей общей модели. Для сравнения результатов расчетов с данными натуральных измерений выведены скорости и направления течений в точках с координатами постановки станций ADCP WH-600 и Аквалог.

Пример расчетов (мгновенное распределение течений после адаптации модели к внешним факторам) приведен на рис. 6.25, на котором отображена карта поверхностных течений для всего Черного моря по состоянию на 24.01.2011. Модельные расчеты достаточно корректно воспроизводят основные черты циркуляции: общая циклоническая завихренность поверхностных вод, а также антициклонические образования между стрежнем основного течения и берегом (помечены пунктирными линиями). Напомним, что представленная картина получена по весьма упрощенной физической схеме, не учитывающей важные гидро- и термодинамические аспекты (обмен на границе раздела, Босфорское течение, сток рек, упрощенная схема оценки вертикального и горизонтального турбулентного обмена и пр).

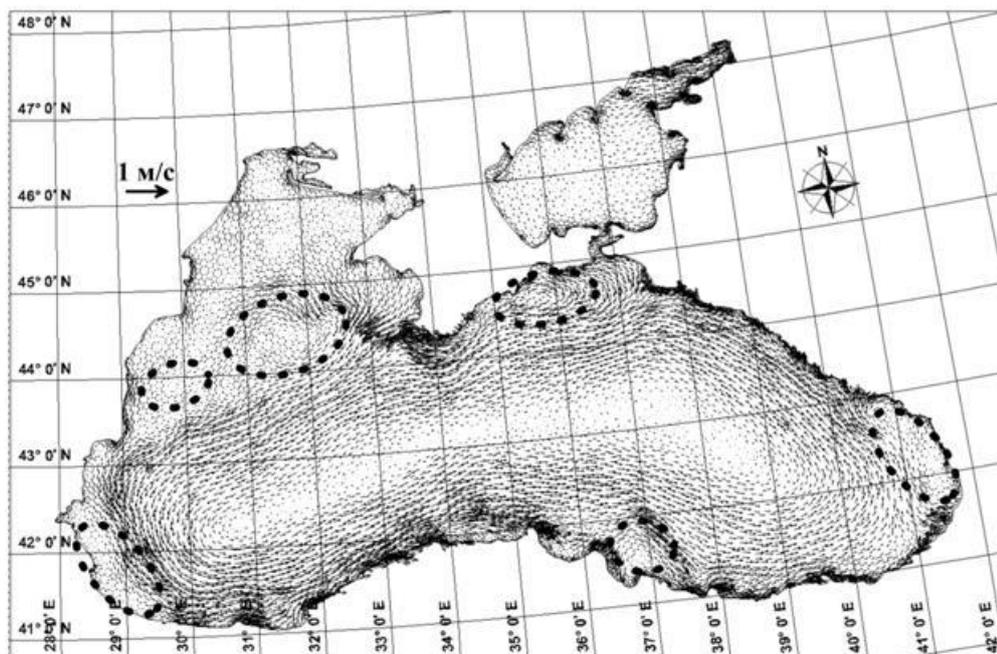


Рисунок 6.25 – Скорости и направления поверхностных течений по состоянию на 24.01.2011, полученные по гидродинамической модели Черного моря

Результаты расчетов по локальной модели и сравнение их с результатами натуральных измерений представлены на рисунках 6.26 и 6.27 для точек постановки ADCP WH-600 и Аквалог соответственно.

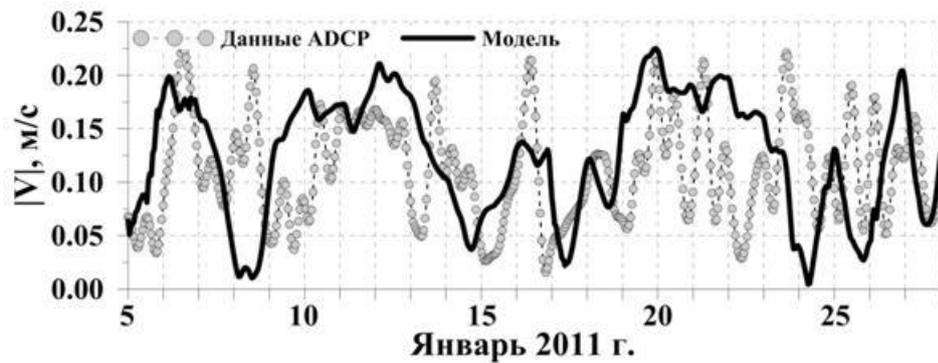


Рисунок 6.26 – Модули горизонтальных скоростей течений (м/с). Результаты измерений ADCP (на глубине 3.2 м) и модельные данные

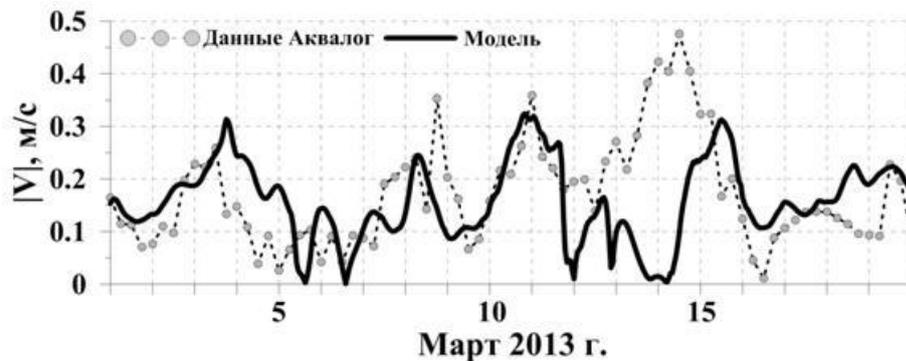


Рисунок 6.27 – Модули горизонтальных скоростей течений (м/с). Результаты измерений Аквалог (на глубине 35 м) и модельные данные

Полученные по локальной модели результаты показывают хорошее соответствие данным натурных измерений (рис. 3-5). Совпадают не только значения рассчитанных и измеренных значений модуля скорости течения, но и характерный период его изменчивости, составляющий несколько суток.

Более детально разработанная модель была исследована на примере периода января 2011 года. В расчетной точке постановки станции ADCP WH-600 выведены результаты расчетов по следующим моделям:

1. Гидродинамическая модель всего Черного моря.
2. Гидродинамическая модель локального участка полигона.
3. Объединенная гидродинамическая и спектральная волновая модели локального участка полигона.

Результаты сравнения представлены на рисунке 6.28.

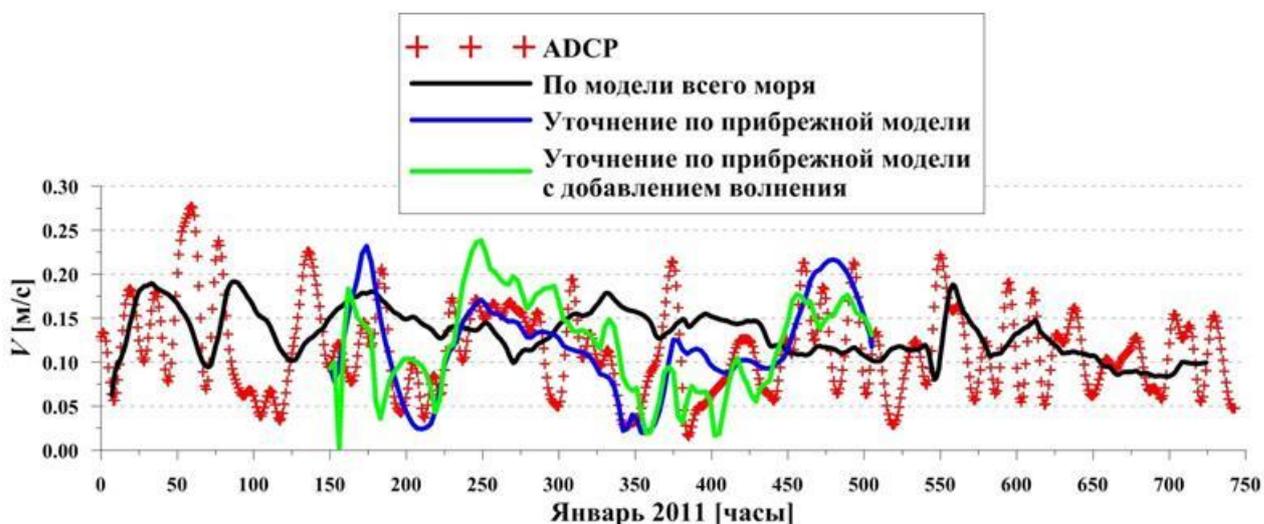


Рисунок 6.28 – Скорости течений в точке постановки станции ADCP WH-600 по результатам измерений и различных численных экспериментов. Январь 2011 г.

Анализ результатов, представленных на рис. 6.28 показывает, что исследуемые модели с различной степенью соответствия описывают результаты натурального эксперимента (обозначены красными крестиками).

Гидродинамическая модель Черного моря отображает лишь общую тенденцию и характерный субмезомасштабный период изменчивости течений в точке наблюдений (черная линия на графике). Высокочастотные колебания сглажены. Объясняется это тем, что в модели реализована грубая сетка, которая “работает” как высокочастотный фильтр. Полученный результат позволяет сделать вывод, что гидродинамическая модель Черного моря в принятых допущениях, с принятыми размерами расчетных ячеек неприемлема для описания динамических процессов прибрежной шельфовой зоны моря.

Результаты по локальной гидродинамической модели (синяя линия на графике) в целом показывают хорошее соответствие натурным данным. Наибольшее соответствие получено по результатам моделирования на основе объединенной гидродинамической и спектральной волновой моделей. Необходимо обратить внимание, что соответствие получено и в высокочастотной области изменчивости течений, чего не наблюдается по общей и локальной гидродинамическим моделям. На основании сравнения полученных результатов можно сделать вывод, что для описания динамики прибрежной шельфовой зоны моря важно учитывать ветро-волновые движения воды, эффекты взаимодействия волн и течений.

Результаты моделирования субмезомасштабной динамики

В рамках исследования локальной гидродинамической модели выполнен численный эксперимент по реконструкции динамики прибрежной шельфовой зоны района полигона, на котором в период 28.09.2008 экспериментально был зарегистрирован

антициклонический субмезомасштабный вихрь [44]. По принятой расчетной схеме за месячный период сентября 2008 были выполнены расчеты глобальной динамики Черного моря, которые были использованы в качестве граничных условий локальной модели. Результаты расчетов представлены на рисунке 6.29.

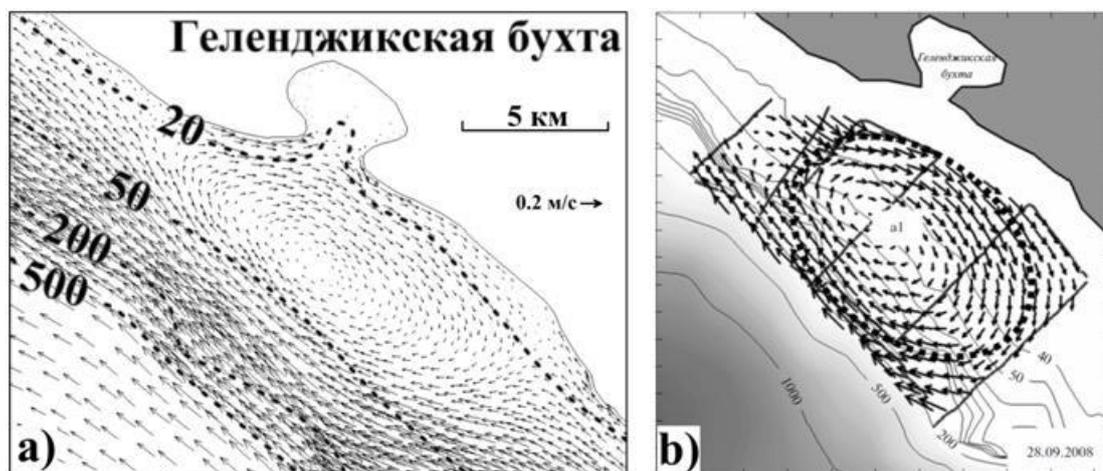


Рисунок 6.29 – Направления течений 28.09.2008: (а)–по результатам моделирования; (б) – экспериментальные данные из работы [44]

Анализ результатов показывает, что локальная модель достаточно достоверно описывает реально наблюдаемую динамику прибрежной зоны района полигона. На рис. 6.29 приведено положение антициклонического вихря, зафиксированного экспериментально методом полигонной съемки (рис. 6.29b) и полученного модельным путем (рис. 6.29a). При одинаковых, в общем, размерах, модельный вихрь более асимметричен, вытянут вдоль берега сильнее, чем по данным наблюдений. «Вытянутость» вдоль берега модельного вихря относительно измеренного объясняется условиями проведения натурного эксперимента. Галсы разнесены по времени (порядка 8 часов между первым и последним пройденными галсами) и выполнялись против генерального направления перемещения вихря. На самом деле, визуально сжат измеренный вихрь, а не вытянут модельный.

В заключение, отметим, что, несмотря на использование в вычислительных моделях весьма упрощенной физики взаимодействия, полученные результаты хорошо соответствуют экспериментально наблюдаемым явлениям.

7 РАЗРАБОТКА СХЕМЫ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВОДНОЙ СРЕДЫ ШЕЛЬФА ЧЕРНОГО МОРЯ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЦИИ СПУТНИКОВОЙ ИНФОРМАЦИИ, ДАННЫХ КОНТАКТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Разработанная схема функциональной структуры системы мониторинга экологического состояния водной среды шельфа Черного моря имеет графическое (блочное) представление (рис. 7.1 и 7.2):

- организационная структура,
- распределение обязанностей и связей между группами участников проекта,
- взаимодействие со службами Института океанологии РАН и внешними организациями,
- выходная продукция системы мониторинга.

Участники ПНИ – лаборатории и подразделения Института океанологии им П.П.Ширшова РАН (ИОРАН, г. Москва) и его Южного отделения (ЮО ИОРАН, г. Геленджик), индустриальный партнер – ООО «Нерей» (г. Геленджик).

Основную роль в ПНИ от головного института играет коллектив сотрудников Лаборатории экспериментальной физики океана (ЛЭФО) под руководством д.ф.-м.н. А.Г. Зацепина.

Организационные функции, выполняемые коллективом ЛЭФО:

- взаимодействие с Минобрнауки РФ по контролю за ходом выполнения ПНИ, включая подготовку регулярной отчетности по ПНИ;
- распределение работ по исполнителям темы ПНИ;
- формирование календарных планов проведения этапов экспедиционных работ в Черном море;
- подготовка приказов дирекции ИО РАН о проведении экспедиции;
- организация экспедиций, в том числе отправка экспедиционного оборудования и научно-инженерных групп;
- подготовка предложений по предоставлению специального оборудования индустриальным партнером ПНИ;
- выполнение функций по материальной ответственности за принятие на баланс, использование и списание научного и вспомогательного оборудования экспедиций;
- организация и проведение рабочих совещаний по теме ПНИ;
- подготовку отчетности по теме ПНИ для Минобрнауки;

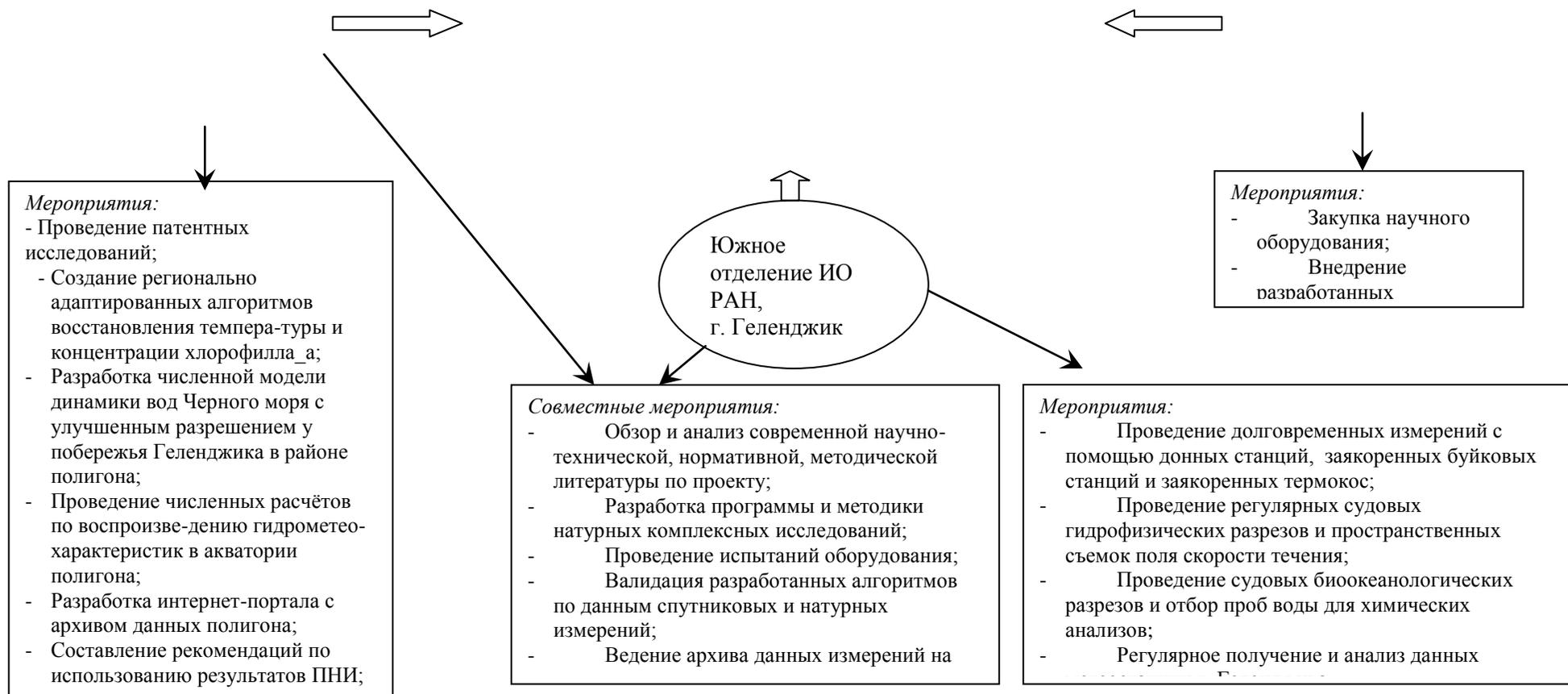


Рисунок 1 – Обобщенная схема функциональной структуры системы мониторинга экологического состояния водной среды шельфа Черного моря

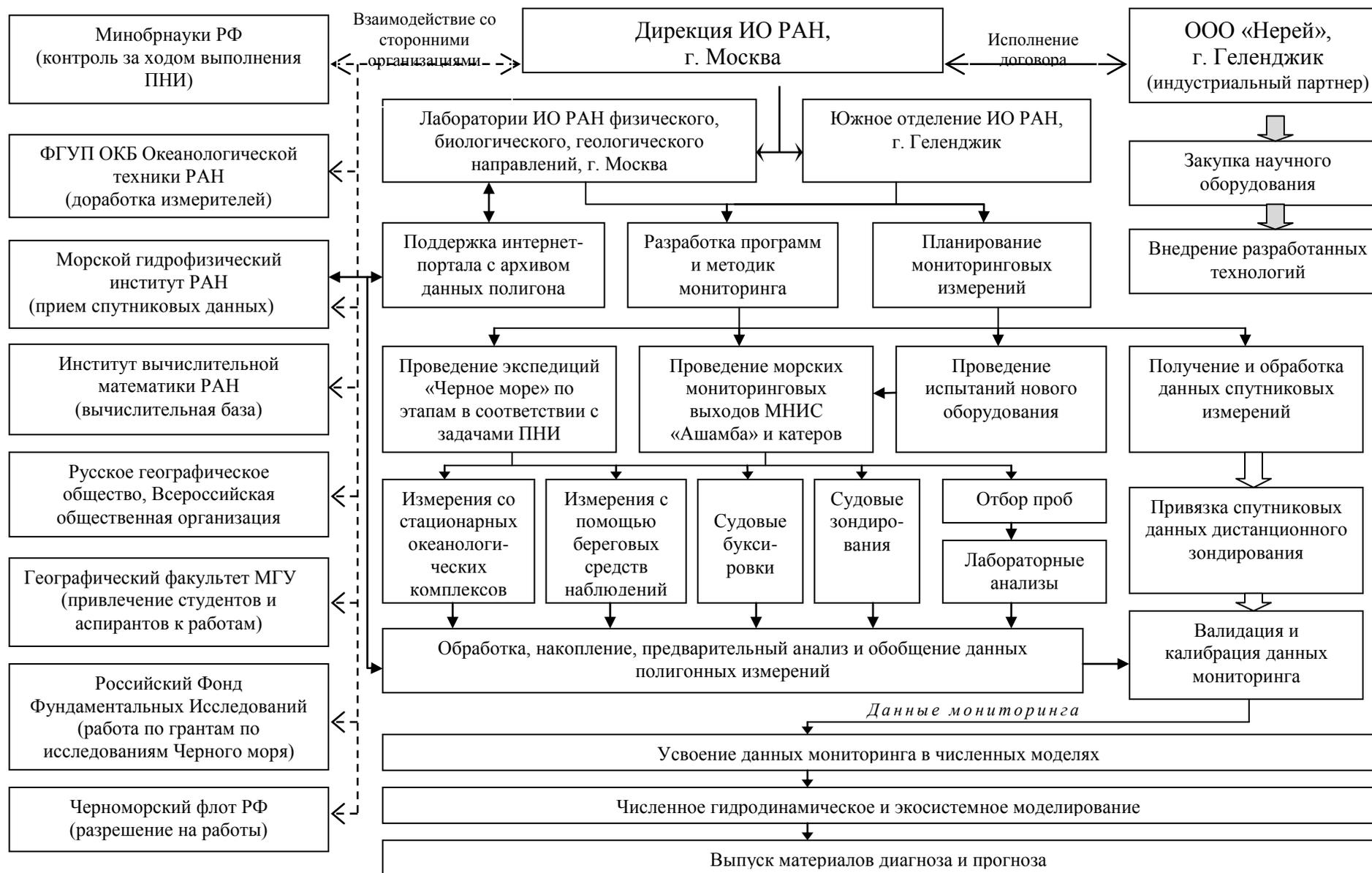


Рисунок 2 – Схема функциональной структуры системы мониторинга экологического состояния водной среды шельфа Черного моря

- представление результатов ПНИ на Ученом совете ИО РАН и на конференциях;
- взаимодействие со сторонними организациями, в том числе РАН, Росгидромета, а также Русским географическим обществом, Российским фондом фундаментальных исследований, Черноморским флотом ВМФ России и высшими учебными заведениями Минобрнауки,
- обмен научно-технической информацией и координация работ по совместной обработке и анализу данных мониторинга;
- контроль за своевременной публикацией результатов ПНИ индивидуальными исполнителями;
- взаимодействие с индустриальным партнером в соответствии с обязательствами, принятыми в рамках ПНИ.

Группа исполнителей ПНИ от ЛЭФО систематизирует и анализирует гидрофизические данные по Черному морю.

К научной работе по тематике ПНИ привлекаются сотрудники Лаборатории экологии планктона (ЛЭП) ИО РАН, которые на основе системного отбора проб в акватории мониторинга исследуют важнейшие компоненты черноморских планктонных сообществ: фитопланктона, планктонных простейших, микро- и мезозoopланктона. Работы сотрудников ЛЭП ориентированы на изучение функциональных связей между структурой, динамикой, продукцией планктона и физическими и химическими параметрами водной среды, взаимоотношений между важнейшими компонентами планктонных сообществ в Черном море.

Для выполнения специальных задач в рамках ПНИ в ЛЭФО привлекаются (по трудовым соглашениям) квалифицированные сотрудники-совместители из институтов РАН: Института вычислительной математики (г. Москва) и Морского гидрофизического института (г. Севастополь). В обязанности этих специалистов входит решение специальных научно-технических задач:

- обработка данных дистанционного зондирования акватории мониторинга в Черном море;
- создание регионально адаптированных алгоритмов восстановления температуры и концентрации хлорофилла_a по спутниковым данным;
- разработка численной модели динамики вод Черного моря с улучшенным разрешением у побережья Геленджика в районе мониторинга;
- проведение численных расчётов по воспроизведению гидрометеорологических характеристик в акватории мониторинга.

От головного института в ПНИ также участвует Отдел информационных технологий (ОИТ) ИО РАН, в обязанности которого входит разработка интернет-портала с архивом данных полигона.

В рамках ПНИ лаборатории и подразделения головного института взаимодействуют с ЮО ИО РАН (директор – к.г.н. С.Б. Куклев). Совместно решаются следующие научно-организационные задачи:

- координация работ научных подразделений ЮО ИО РАН(Отдела прибрежных исследований, Отдела гидрофизических исследований, Лаборатории химии) по тематике ПНИ;

- прием и размещение научных экспедиций;

- разработка программ и методик натурных комплексных исследований на полигоне;

- организация и проведение испытаний оборудования;

- ведение архива данных измерений на полигоне;

- валидация разработанных алгоритмов по данным спутниковых и натурных измерений;

- финансирование и снабжение малого научно-исследовательского судна «Ашамба».

При этом ЮО ИО РАН самостоятельно решает вопросы оперативного управления МНИС «Ашамба».

В части научно-исследовательской работы по тематике ПНИ в компетенцию ЮО ИО РАН входят:

- проведение долговременных измерений с помощью донных станций, заякоренных буйковых станций и заякоренных термокос;

- проведение регулярных судовых гидрофизических разрезов и буксировок измерителей течений;

- проведение судовых биоокеанологических разрезов, отбор и химический и биологический анализы проб воды;

- регулярное получение и анализ данных метеостанции г. Геленджика.

Схема функциональной структуры системы мониторинга экологического состояния водной среды шельфа Черного моря может уточняться на заключительном этапе ПНИ.

8 ПРИОБРЕТЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ДАННЫХ СПУТНИКОВЫХ И ПОДСПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ (РАБОТА ИНДУСТРИАЛЬНОГО ПАРТНЕРА)

Развитие технологий мониторинга и прогнозирования экологического состояния водной среды морского шельфа требует внедрения новых технических средств наблюдений, сбора, обработки и передачи данных. Существенно возрастают информационные потоки как внутри системы мониторинга, так и передаваемые на внешние устройства. Для обеспечения эффективных исследовательских работ в рамках проекта и решения задач согласно Технического задания на высоком уровне за счет средств Индустриального партнера (ООО СФ «Нерей») приобретены две рабочие станции HP Z840 с мониторами HP TFT P221. Рабочие станции позволяют оптимизировать информационные потоки, сократить время их обработки и передачи.

Приобретаемые рабочие вычислительные станции станут важным элементом системы мониторинга экологического состояния водной среды шельфа Черного моря, средством интеграции данных контактных измерений, спутниковой информации и результатов численного моделирования.

Большое значение рабочим вычислительным станциям придается в вопросах решения задач оперативной океанологии, а именно:

- усвоение спутниковых и радиолокационных данных для моделей оперативного прогноза;
- построение диагностических и прогностических полей гидрофизических параметров в шельфовой зоне моря (морских течений, поверхностного волнения);
- экологический мониторинг (контроль загрязнения морской среды, диагностика поступления и переноса загрязняющих веществ);
- информационное обеспечение заинтересованных организаций и структур;
- оценка экологических рисков.

Организуемые рабочие станции обладают серверными технологиями хранения, обработки и использования получаемой океанологической информации, что качественно значительно улучшает уровень мониторинга.

В целом, внедрение рабочих вычислительных станций в приборную структуру системы мониторинга позволит существенно расширить круг задач оценки и прогноза развития гидрологических и гидродинамических процессов, экологического состояния морского шельфа.

Необходимость приобретения 2-х рабочих станций обусловлена тем, что численное моделирование Черного моря с повышенным пространственным разрешением в прибрежной зоне его северо-восточной части, где находится подспутниковый полигон ИОРАН производится двумя группами специалистов, одна из которых базируется в ЮО ИОРАН (г. Геленджик), а другая – в ИОРАН (г. Москва). Эти группы используют различные численные модели и сопоставления расчетных результатов с данными наблюдений позволит выявить достоинства и недостатки каждой из моделей и в последствии сделать выбор в пользу одной из них. Для получения адекватных и сопоставимых результатов моделирования этим группам необходимо иметь одинаковые вычислительные возможности.

Предусмотренное Техническим заданием приобретение акустический измеритель течений Nortek Aquadopp оказалось невозможным по форс-мажорным обстоятельствам. Этот прибор, произведенный в Норвегии, предназначался для доукомплектования измерительных средств мониторинга. Однако в связи с изменением текущего курса рубля стоимость прибора возросла практически в два раза и составила с доставкой в Москву 1,25 млн. руб., что превысило смету. В связи с этим было принято решение отказаться от закупки данного прибора.

Поскольку показатели ПНИ не должны быть снижены, было принято решение оптимизировать использование имеющегося парка измерительных приборов путем увеличения оборота измерительных средств за счет более частых перестановок и сокращения технического обслуживания. Качественные измерения аналогичные тем, что могли быть проведены с помощью прибора Nortek Aquadopp, будут выполнены с помощью имеющегося в ИО РАН акустического доплеровского профилографа течений Nortek AWAC.

9 ПРОВЕДЕНИЕ АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ КОНТАКТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ АВТОНОМНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ НА ПОДСПУТНИКОВОМ ПОЛИГОНЕ В ШЕЛЬФОВО-СКЛОНОВОЙ ЗОНЕ ЧЕРНОГО МОРЯ

9.1 Описание выполненных работ

Результаты контактных измерений на подспутниковом полигоне ИОРАН в шельфово-склоновой зоне Черного моря в районе г. Геленджика можно разделить на 2 группы:

- 1) полученные с помощью регулярных комплексных измерений с борта МНИС «Ашамба», а также с помощью маломерных судов – катеров;
- 2) полученные с помощью измерений, выполненных автономными донными и заякоренными буйковыми станциями.

Контактные измерения на подспутниковом полигоне ИОРАН в шельфово-склоновой зоне Черного моря в ходе судовых работ.

По программе исследований за отчетный период на базе ЮО ИО РАН (г. Геленджик) в общей сложности было выполнено 17 экспедиционных выходов на БМП-74 «Ашамба» и 8 выходов на маломерных судах («Воронеж-М», «Кайман», «Мэри Фишер»), оборудованных всеми техническими средствами, необходимыми для решения задач натурных исследований.

Технические средства БМП – 74 «Ашамба» :

- 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.

Экспедиционными работами на БМП-74 «Ашамба» решались следующие основные задачи:

- 1) судовые разрезы 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 акустический доплеровский профилограф RDI WH – 300;

3) обеспечение работы автономных станций наблюдения гидрофизического полигона.

Маломерные плавсредства использовались при проведении следующих экспедиционных работ:

- 1) обеспечение работы автономных станций ADCP – 22 м (створ Голубой бухты), AWAC – 25 м (створ Толстого мыса), термокосы № 1 на глубине 22 м;
- 2) проведение дрейфтерного эксперимента;
- 3) батиметрическая съемка эхолотом Humminbird 898cx Combo Si;
- 4) обслуживание водлазов, обеспечение работ при снятии и установке донных станций.

Описание задач каждого экспедиционного выхода за период 2015 г. представлено в таблицах 9.1 и 9.2.

Таблица 9.1 – Экспедиционные работы на БМП-75 “Ашамба”

№ пп	Тема исследований	Даты проведения	Краткое описание задач
1	2	3	4
1	Обслуживание гидрофизического полигона	16.01-17.01 – 2 выхода	Обслуживание полигона, снятие приборов
2	Мониторинговые экологические исследования	19.06. –1 выход	Исследования гидрофизических, гидробиологических и гидрохимических параметров
3	Мониторинговые экологические исследования	28.01– 1 выход	Исследования гидрофизических, гидробиологических и гидрохимических параметров
4	Обслуживание гидрофизического полигона	24.02-25.02 – 2 выхода.	Обслуживание полигона, снятие приборов
5	Мониторинговые экологические исследования	27.02 – 1 выход	Исследования гидрофизических, гидробиологических и гидрохимических параметров
6	Обслуживание гидрофизического полигона	03.03 – 1 выход	Поиск донной станции AWAC
7	Гидрофизические исследования	18.03 – 1 выход	Исследования течений буксируемым ADCP
8	Мониторинговые экологические исследования	26.03 – 1 выход	Исследования гидрофизических, гидробиологических и гидрохимических параметров, исследования планктона
9	Мониторинговые экологические исследования	27.03 – 1 выход	Исследования гидрофизических, гидрохимических параметров, состояния планктона
10	Обслуживание гидрофизического полигона	06.04 – 1 выход	Подъем станции Аквалог, поиск станции AWAC

№ пп	Тема исследований	Даты проведения	Краткое описание задач
1	2	3	4
11	Обслуживание гидрофизического полигона	23.04 – 1 выход	Постановка станции Аквалог
12	Мониторинговые экологические исследования	27.04. – 1 выход	Исследования гидрофизических, гидробиологических и гидрохимических параметров
13	Обслуживание гидрофизического полигона	06.05. – 1 выход.	Постановка ADCP, термокосы 85 м
14	Мониторинговые экологические исследования	07.05 – 1 выход.	Исследования гидрофизических, гидробиологических и гидрохимических параметров
15	Мониторинговые экологические исследования	12.05 – 1 выход.	Исследования гидрофизических, гидробиологических и гидрохимических параметров
	Всего	с 01.01 по 12.05 17 выходов	

Таблица 9.2 – Экспедиционные работы на маломерных судах

№ пп	Тема исследований	Даты проведения	Краткое описание задач
1	2	3	4
1	Обслуживание гидрофизического полигона	16.01-17.01 – 2 выхода	Обеспечение снятие приборов
2	Обслуживание гидрофизического полигона	24.02-25.02 – 2 выхода.	Обеспечение снятие приборов
3	Обслуживание гидрофизического полигона	03.03 – 1 выход	Поиск донной станции AWAC
4	Обслуживание гидрофизического полигона	06.04 – 1 выход	Подъем станции Аквалог, поиск станции AWAC
5	Обслуживание гидрофизического полигона	23.04 – 1 выход	Постановка станции Аквалог
6	Мониторинговые экологические исследования	07.05 – 1 выход.	Исследования гидрофизических, гидробиологических и гидрохимических параметров
	Всего	с 01.01 по 12.05 8 выходов	

Сведения о постановке и перестановках автономных измерительных станций на подспутниковом полигоне в отчетный период приведены в таблице 9.3.

Таблица 9.3 – Сведения о постановке и перестановках автономных измерительных станций на подспутниковом полигоне в период январь-июнь 2015 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 Aquadopp 2 мГц	16.01- по настоящее время (ориентировочно до середины июня 2015)	Траверс Голстого мыса Геленджикской бухты 44°29, 270' с.ш., 37°58, 496' в.д	~270
2	AWAC – 25 м. Донная станция с акустическим профилографом течений ADCRAWAC 1000 кГц с функцией измерения поверхностного волнения.	Прибор, предположительно утерян. Последние данные относятся к периоду 25.06-22.09 2014 г	Траверс Голстого 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 ADCPRDIWN 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. За период 01.01-30.05 2015 года получен непрерывный ряд (несущественные разрывы, связанные с перебоями берегового питания)	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

№ пп	Описание измерительной системы	Даты (установки-снятия системы)	Место установки, координаты	Глубина места, м
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, заглубление подповерхностной плавучести (сигары) – 9-10 м.) Термокоса № 2	Прибор, предположительно утерян. Последние данные относятся к периоду 02.07-22.09 2014 г	Створ Толстого мыса Геленджикской бухты 44 ⁰ 32.240 с.ш.; 38 ⁰ 02.500 в.д. 44 ⁰ 32.324 с.ш., 38 ⁰ 02.380 в.д	28.8
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. ADCP RDI-300. Донный акустический профилограф течений.	16.05-по наст. время (ориентировочно до конца июня) В 2015 г акустический профилограф течений ADP Sontek-250 заменен на ADCP RDI-300	Створ Толстого мыса Геленджикской бухты Координаты термокосы № 3: 44 ⁰ 30.585' с.ш., 37 ⁰ 58.522' в.д. Координаты ADCP: 44 ⁰ 30.551 с.ш.; 37 ⁰ 58.552 в.д.	85

9.2 Сезонный ход характеристик скорости течения по данным ADCP RDI на кабеле (2013-2014 гг.)

Донная станция ADCP (RDI WH 600 кГц) была установлена на траверзе Голубой бухты на расстоянии 900 м (0.5 миль) от берега на изобате 22 м. Этот прибор позволил в

2013 и 2014 гг. получить длинные (209 дней в 2013 году и 294 дня в 2014 году) ряды данных о профиле скорости горизонтального течения и его изменчивости.

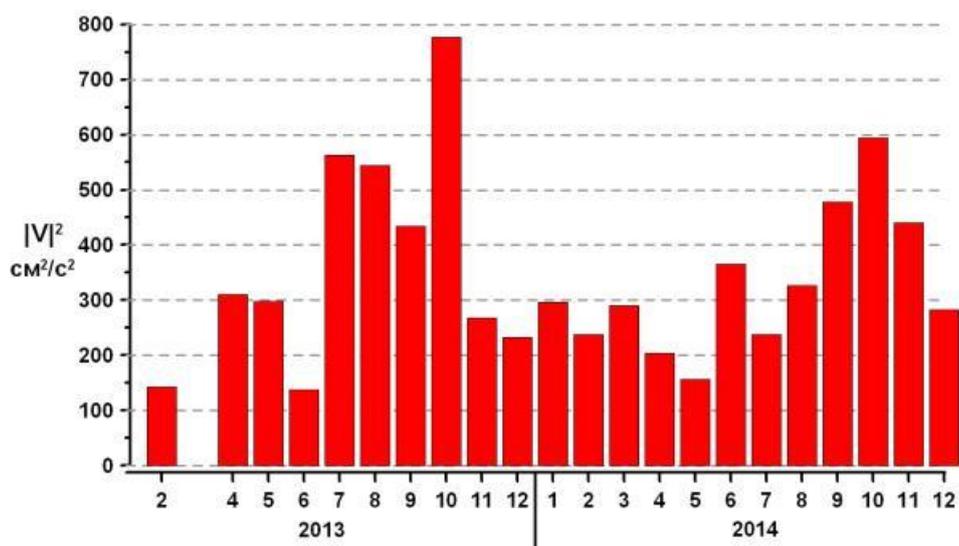
«Мертвая зона» перед самым прибором составляла порядка полутора метра, и еще около полуметра в высоту была металлическая пирамида, на которой был установлен на дне ADCP RDI. Таким образом, исследованный профиль был от поверхности до глубины 20 метров.

Начало записи датировано 14 февраля 2013, после этого, с эпизодическими перерывами по техническим причинам, данные были получены за все месяцы исследуемого периода, кроме апреля 2013 г. Частота получения профиля течений, получаемого с ADCP RDI, с 14 февраля по 10 июня 2013 г. составляла 1 профиль каждые 10 минут. С 10 июня 2013 г. она была увеличена до 1 профиля каждые 30 секунд.

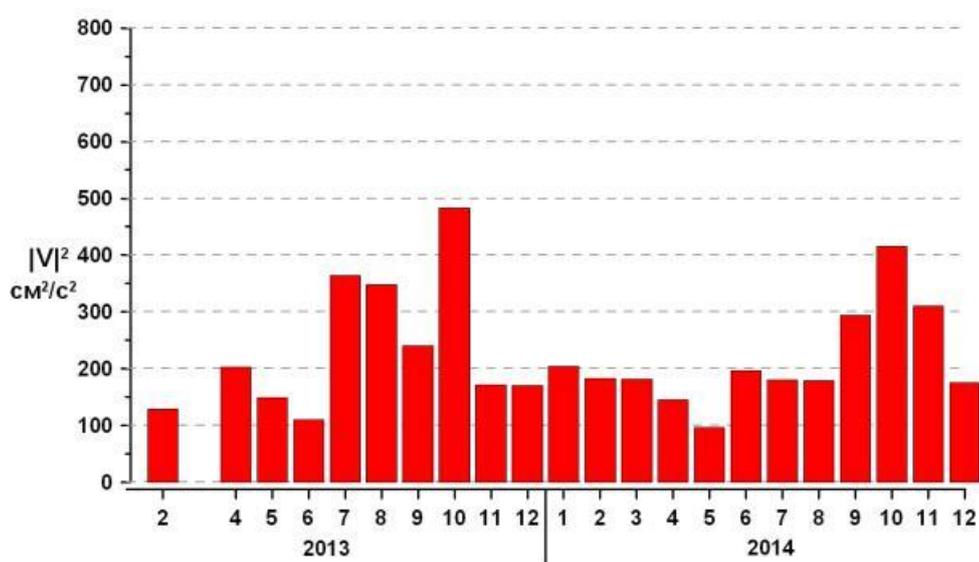
Для анализа профиль течений разбивался на две половины, при этом данные, полученные в верхних трех метрах водного столба, были отброшены из-за высокой зашумленности. Таким образом, рассматривался отдельно верхний слой с 3 до 10 метров, и нижний слой с 10 до 20 метров. Система координат была повернута против часовой стрелки на 50° , что позволило выделить вдоль- и поперекбереговые компоненты горизонтальных течений.

На основе полученных данных были рассчитаны среднемесячные и среднегодовые значения квадрата общей скорости горизонтального течения в верхней и нижней части водного столба, а также среднемесячный и среднегодовой перенос воды во вдоль- и поперекбереговом направлении.

На рис. 9.1 показаны среднемесячные значения квадрата скорости (удельной кинетической энергии) горизонтального течения в верхней и нижней части водного столба. Как видно из рисунка, общий тренд оставался одинаковым в обеих частях водного столба.



а



б

Рисунок 9.1 – Среднемесячные значения квадрата скорости горизонтального течения в верхней (а) и нижней (б) части водного столба на мониторинговой донной станции с глубиной 22 м. Цифрами по оси X отложены номера месяцев в 2013 и 2014 гг.

Среднее значение квадрата скорости горизонтального течения в нижней части водного столба за 2013 год составило $293.8 \text{ см}^2/\text{с}^2$, за 2014 – $214.6 \text{ см}^2/\text{с}^2$, общее среднее значений за два года наблюдений - $253.6 \text{ см}^2/\text{с}^2$. В верхней части водного столба среднегодовые значения были $465.6 \text{ см}^2/\text{с}^2$ и $326.0 \text{ см}^2/\text{с}^2$ за 2013 и 2014 гг. соответственно, общее среднее значение за два года – $392.0 \text{ см}^2/\text{с}^2$, что более чем в полтора раза больше, чем в нижнем слое. Максимальные значения в обоих слоях достигались в октябре, причем как в 2013, так и в 2014 году, составив соответственно 777.6 и $594.4 \text{ см}^2/\text{с}^2$ для верхнего слоя, и 483.5 и $416.0 \text{ см}^2/\text{с}^2$ для нижнего. Минимальные значения в 2013 г были обнаружены в июне, а в 2014 – в мае месяце, составив соответственно 298.6 и $156.8 \text{ см}^2/\text{с}^2$ в верхнем слое и 110.6 и $96.3 \text{ см}^2/\text{с}^2$ в нижнем.

Осенний максимум удельной кинетической энергии прибрежного течения – довольно неожиданное явление, поскольку максимум кинетической энергии Основного черноморского течения (ОЧТ) наблюдается в конце зимы (февраль-март).

Среднемесячный перенос воды поперек- и вдольбереговыми компонентами течения был рассчитан следующим образом: среднее значение компоненты горизонтального течения в заданном слое по каждому профилю умножалось на период осреднения для этого профиля, после чего все полученные таким образом значения суммировались за месяц.

Для вдольбереговой компоненты положительные значения считались направленными вдоль берега на северо-запад, а отрицательные – на юго-восток.

Для поперекбереговой компоненты положительные значения считались направленными в сторону берега, а отрицательные – в сторону открытого моря.

На рис. 9.2 показаны среднемесячные значения расстояния переноса воды вдольбереговой компонентой течения, а на рис. 9.3 – поперекбереговой компонентой.

Можно отметить следующие закономерности. Для вдольбереговой компоненты течений перенос в верхнем и нижнем слое отличался только интенсивностью (в среднем в 2 раза больше в верхнем слое), при этом направление переноса в обоих слоях в основном совпадало (исключением стал апрель 2013 г, когда перенос в обоих слоях был незначительным). Тем не менее, в верхнем слое положительный суммарный перенос воды был сильнее, и за два года наблюдений составил 49.37 км, в то время как в нижнем слое суммарный за два года перенос воды был отрицательным и составил -22.7 км.

Для поперекбереговой компоненты картина была иной. Перенос воды в верхнем слое был почти всегда направлен в сторону берега, в то время как в нижнем слое он был большей частью направлен в сторону открытого моря. Этот результат закономерен, поскольку в Черном море, из-за циклонического знака завихренности напряжения трения ветра в верхнем экмановском слое происходит дивергенция вод и их перенос направлен к берегу, тогда как в нижнем слое должен наблюдаться компенсирующий отток.

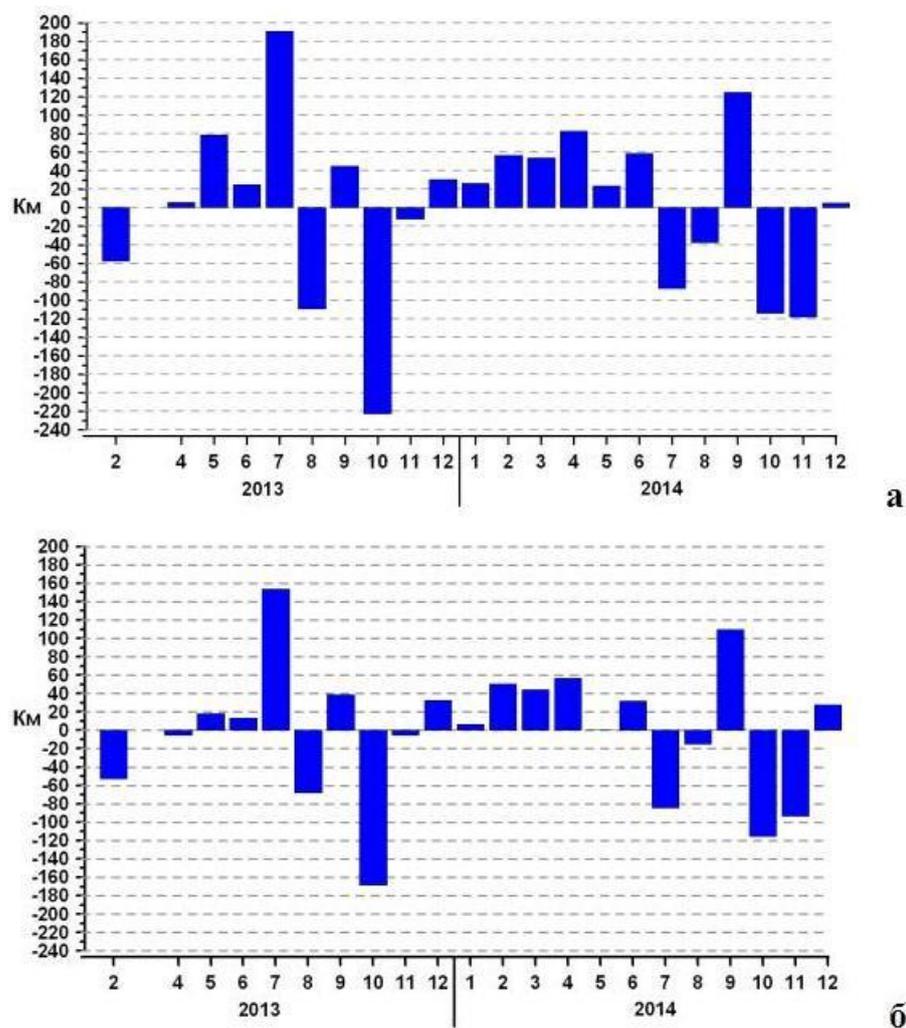


Рисунок 9.2 – Среднемесячный перенос воды вдольбереговой компонентой течения в верхней (а) и нижней (б) части водного столба на мониторинговой донной станции с глубиной 22 м. Цифрами по оси X отложены номера месяцев в 2013 и 2014 гг. Положительные значения означают направление на северо-запад, отрицательные – на юго-восток

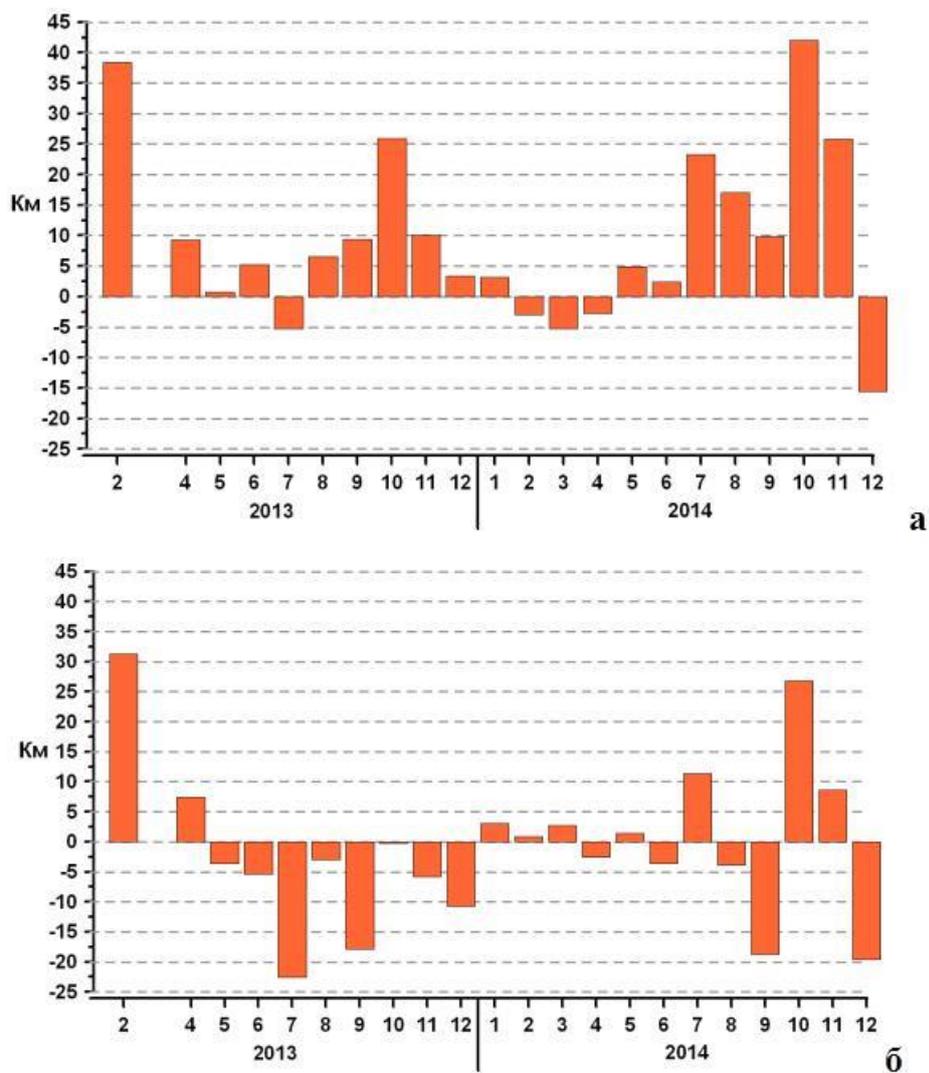


Рисунок 9.3 – Среднемесячный перенос воды поперекбереговой компонентой течения в верхней (а) и нижней (б) части водного столба на мониторинговой донной станции с глубиной 22 м. Цифрами по оси X отложены номера месяцев в 2013 и 2014 гг. Положительные значения означают направление к берегу, отрицательные – в сторону открытого моря.

Можно отметить, что в тех случаях, когда поперекбереговой перенос воды был в обоих слоях направлен к берегу, вдольбереговой перенос был направлен на северо-запад, и наоборот, при поперекбереговом переносе воды, направленном в обоих слоях в сторону моря, вдольбереговой перенос был направлен на юго-восток.

В целом перенос воды в поперекбереговом направлении был более чем на порядок слабее, чем во вдольбереговом.

В таблице 9.4 приведены результаты расчета среднегодовых значений скорости горизонтальных компонент течения, как в верхнем и нижнем слоях по отдельности, так и во всем слое воды целиком.

Таблица 9.4 – Средние значения вдоль- и поперекбереговой компонент горизонтальной скорости течения, рассчитанные за 2013 и 2014 годы, а также за весь период измерений в целом, в верхнем (3-10 м) и нижнем (10-20 м) слоях, а также во всем исследуемом слое.

Год	Компонента скорости течения	Верхний слой (3-10 м), см/с	Нижний слой (10-20 м), см/с	Весь водный столб (3-20 м), см/с
2013	вдольбереговая	-0.127	-0.205	-0.162
	поперекбереговая	0.512	-0.151	0.126
2014	вдольбереговая	0.315	0.078	0.187
	поперекбереговая	0.427	0.028	0.192
2013+2014 (среднее за два года)	вдольбереговая	0.112	-0.052	0.028
	поперекбереговая	0.466	-0.054	0.162
Среднеквадратичное отклонение	вдольбереговая	19.032	14.838	16.277
	поперекбереговая	3.796	3.390	3.084

9.3 Анализ данных ADCP и AWAC с целью исследования фазовых сдвигов наблюдавшихся колебаний /волн

По данным измерений скорости течений, полученных акустическими измерителями скорости на Черноморском полигоне в нескольких удаленных друг от друга точках, планировалось рассмотреть фазовые сдвиги волновых колебаний.

Рассматривались 10 временных участков, в период которых проводились синхронные измерения скорости течений в точках 1 и 2 Черноморского полигона, в которых были установлены приборы ADCP и AWAC соответственно.

Название файлов с данными приведено в таблице 9.5. В правом столбце указаны номера временных участков.

Таблица 9.5 – Состав файлов данных проанализированных измерений.

Названия файлов с данными	Номер временного участка
adcp2012_1120-1218 awac2012_1120-1218	1
adcp2013_0411-0518 awac2013_0411-0518	2
adcp2013_0531-0613 awac2013_0531-0613	3
adcp2013_0710-0720 awac2013_0709-0810 adcp2013_0720-0731 adcp2013_0731-0810	4
adcp2014_0109-0119 awac2014_0109-0125 adcp2014_0119-0125	5
adcp2014_0221-0303 awac2014_0221-0404 adcp2014_0303-0313 adcp2014_0323-0403 adcp2014_0403-0411	6
adcp2014_0506-0515 awac2014_0506-0609 adcp2014_0530-0609	7
adcp2014_0703-0708 awac2014_0625-0803 adcp2014_0711-0719 adcp2014_0724-0801	8
adcp2014_0804-0808 awac2014_0806-0923 adcp2014_0809-0812 adcp2014_0813-0823 adcp2014_0825-0919 adcp2014_0919-0923	9
adcp2014_0927-0930 awac2014_0927-0930	10

Ряды данных AWAC, как правило, являются более протяженными, и поэтому по ним выбирались номера временных участков (от 1 до 10). Эти отдельные участки будут отдельно рассматриваться ниже.

Были воспроизведены временные вертикальные разрезы (рис. 9.4), 2) временные графики скорости для отдельных горизонтов – как правило, для горизонтов вблизи 5 м и 10 м (пример на рис. 9.5). Сопоставление этих графиков, относящихся к точкам 1 и 2 (ADCP и AWAC), позволяло оценить фазовые сдвиги.

Рассматривались также квази-годографы (рис. 9.6), позволяющие оценить пространственные перемещения частиц жидкости в рассматриваемых точках на выбранных горизонтах.

Были рассмотрены все 10 серий (временных участков) данных. На примере серий 1, 6, 8, 9 будут показаны особенности течений, прежде всего их волновых составляющих.

В серии 1 рассматривались данные файлов `adcp2012_1120-1218` и `awac2012_1120-1218` (табл. 9.2, в дальнейшем будет указываться только номер серии).

На рис. 9.4 представлены пространственно - временные разрезы составляющих U и V скорости течений, полученные по данным `awac2012_1120-1218` (серия 1). На разрезах видны колебания различных масштабов – от нескольких суток до нескольких часов. В том числе отмечаются отрезки, для которых характерны квазиинерционные волны с периодами 16 – 18 часов (инерционный период для исследуемого района составляет 17.1 ч).

Вертикальная структура скорости в большинстве случаев однородная – на разрезах имеет вид «вертикальных столбов». Такие структуры характерны не только для инерционных колебаний, но и для субинерционных волновых составляющих скорости.

На рис. 9.5-9.6 представлены изменения во времени составляющих скорости U на горизонте ~ 12 м, полученные в серии 1 по данным ADCP (красная линия) и AWAC (синяя линия) (`adcp` и `awac2012_1120-1218`). Время представлено в сутках начиная с 1 января 2012 г., по вертикали – глубина в м.

Видно, что составляющие U в точках 1 и 2 практически совпадают. Смещения пиков практически не наблюдается. В редких случаях отмечаются смещения ~ 12 мин, что соответствует временному шагу данных.

На рис. 9.7 представлена последовательная векторная диаграмма течений на горизонте ~ 12 м в серии 1 по данным AWAC. Диаграмма показывает перемещение частиц, которые они бы совершили, имея скорости, измеренные в том фиксированном месте, где находился прибор. Поскольку скорости в реальности меняются при смещении частицы, то векторную диаграмма течений можно назвать лишь квази – годографом. Векторные диаграммы показывают, что скорости течений имеют колебательную структуру в направлении вдоль берега. В верхнем слое практически всегда отмечается тренд в сторону берега. В разной степени наблюдаемые эффекты отмечаются на других сериях данных.

Спектральные оценки скорости течений были выполнены в терминах вращательных компонент (рис. 9.8). Близкие значения спектральных плотностей S^- и S^+ свидетельствуют о вытянутости вектора скорости вдоль одной линии – в рассматриваемом случае это линия вдоль берега (что в первую очередь видно на годографе). Отмечаются пики на инерционной частоте (соответствующий период ~ 17.1 ч) и на частоте обертона.

При рассмотрении данных 6 серии (рис. 9.9 и 9.10) видны цуги инерционных волн (колебаний). Инерционные колебания наложены на более длиннопериодные осцилляции с масштабами в несколько суток. В различные моменты времени отмечаются смещения фаз инерционных волн: 43 мин (~ 68 сут. по оси x), 72 мин (~ 69 сут.), 101 мин (~ 64 сут.).

На квази годографах (рис. 9.11, 9.12) проявляются петли, которые формируются за инерционный период.

На сериях **9** (рис. 9.13-9.16) и **10** (рис. 9.17-9.19) для субинерционных колебаний с периодами от 1 до ~ 5 суток в рассматриваемых 2-х точках отмечаются заметные отклонения гребней и впадин до одних-двух суток. Рассмотрение смещения фаз инерционных колебаний требует специального анализа. Задача усложняется тем, что происходит наложение относительно слабых инерционных волн с амплитудами около нескольких см на мощные длиннопериодные колебания (с амплитудами до 20 -35 см). Такие длиннопериодные течения могут исказить временные профили инерционных волн за счет доплеровского эффекта и за счет нелинейности.

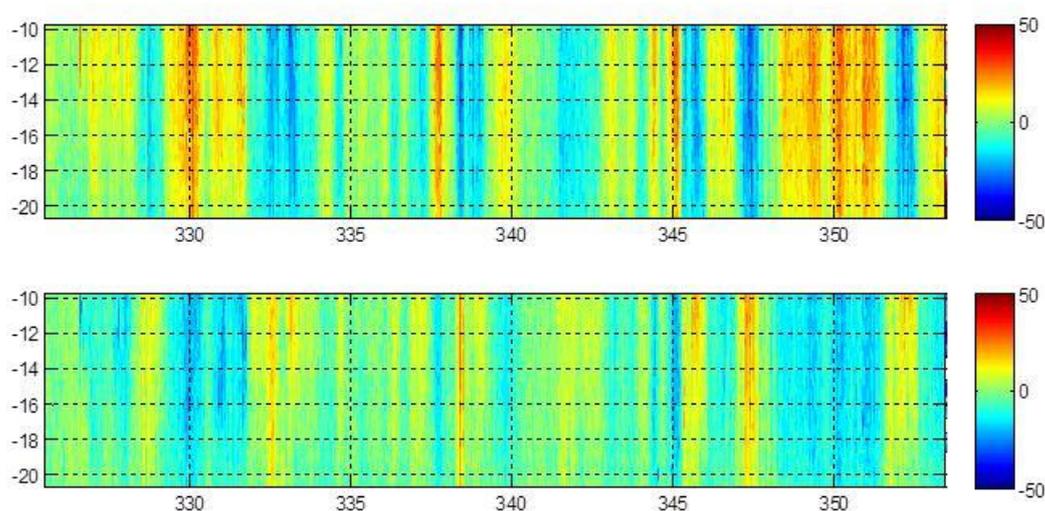


Рисунок 9.4 – Временные пространственные разрезы составляющих U и V скорости течений, полученные по данным awac2012_1120-12 (серия 1)

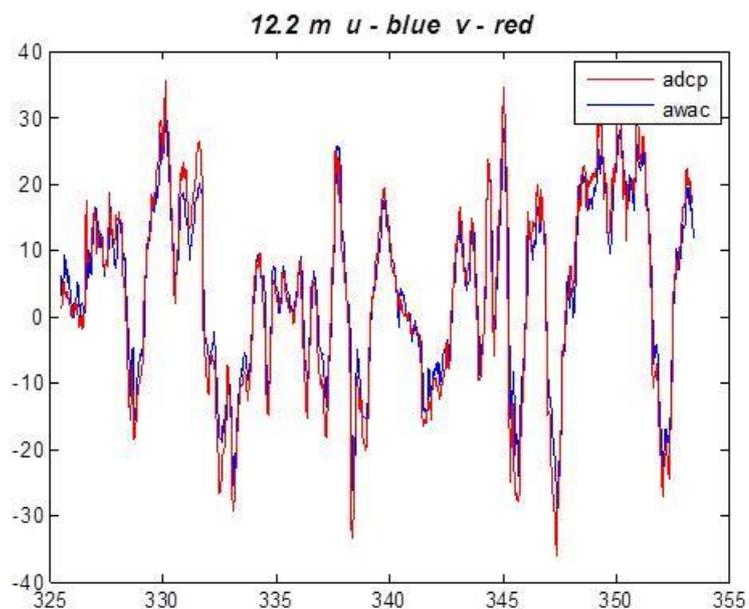


Рисунок 9.5 – Графики временной изменчивости составляющих U скорости течений на горизонте ~ 12 м, полученные в серии 1 по данным ADCP (красная линия) и AWAC (синяя линия) (adcp и awac2012_1120-12). Время представлено в сутках начиная с 1 января 2012, по вертикали – глубина в м. Данные скорости ADCP были подвергнуты коррекции

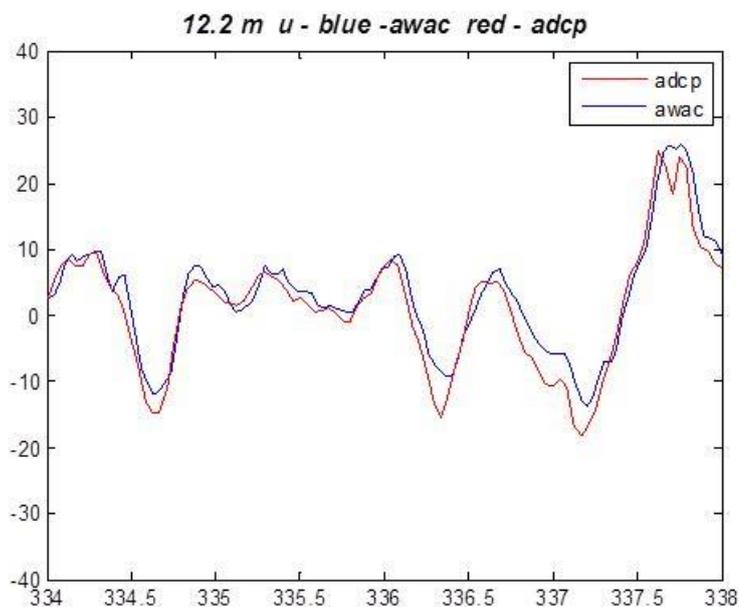


Рисунок 9.6 – Узкий временной отрезок представленной выше составляющих U, где отмечен пук инерционных волн \ колебаний (обозначения те же, что и на рис. 9.5)

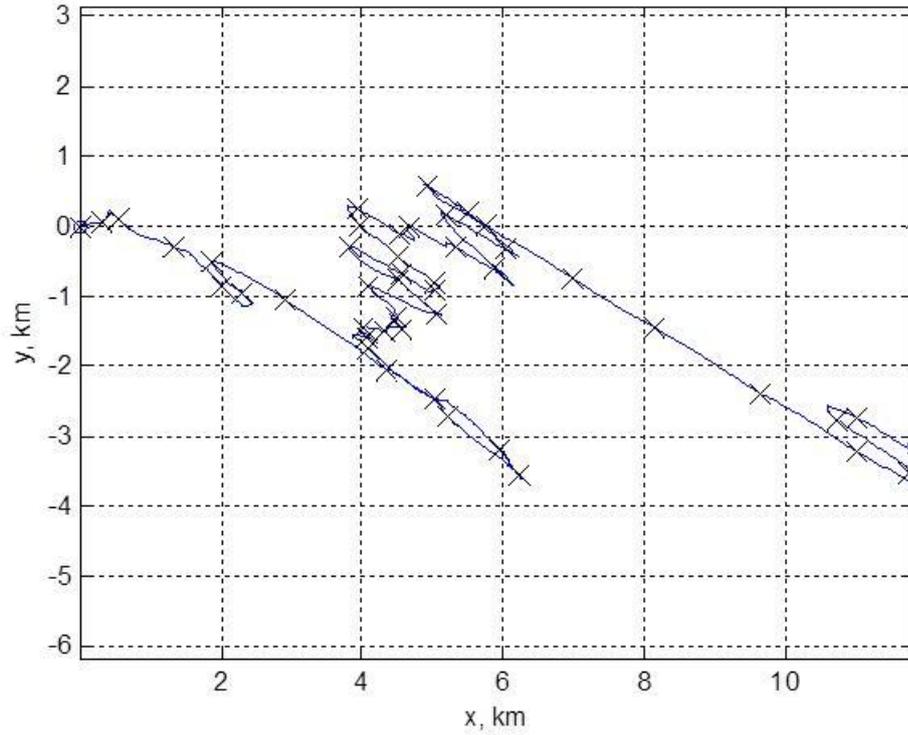


Рисунок 9.7 – Квази – годографы, полученные по данным AWAC в серии 1

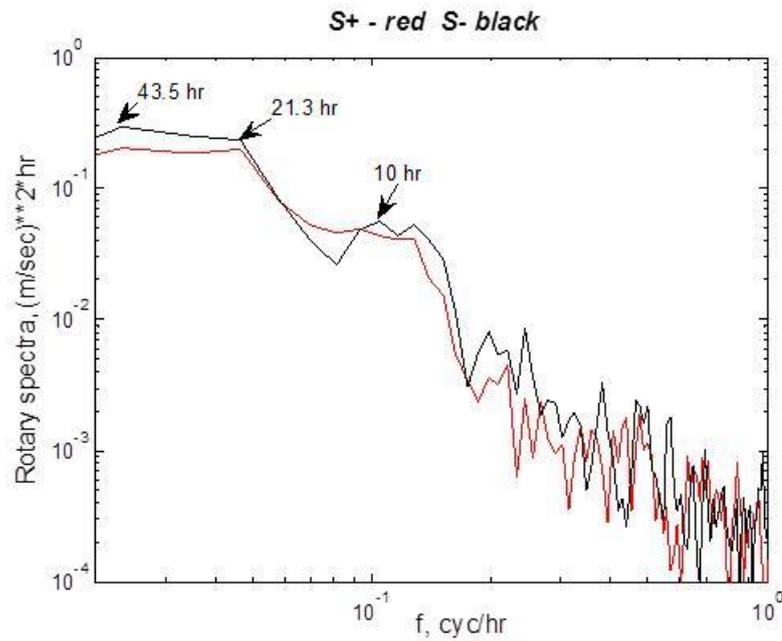


Рисунок 9.8 – Спектральные плотности вращательных составляющих скорости, полученные по данным AWAC в серии 1

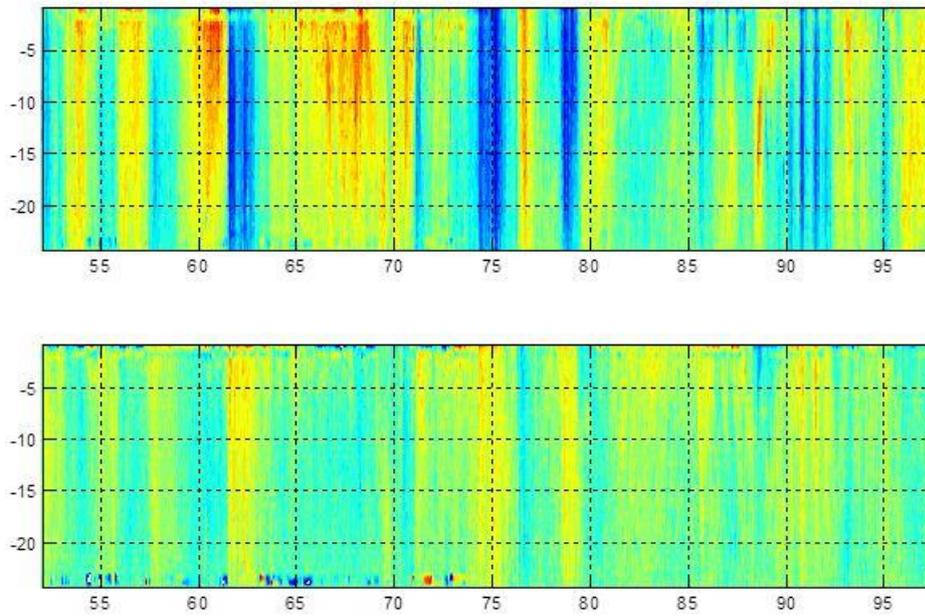


Рисунок 9.9 – Временные пространственные разрезы составляющих U и V скорости течений, полученные по данным **awac2014_0221-0404** (серия 6)

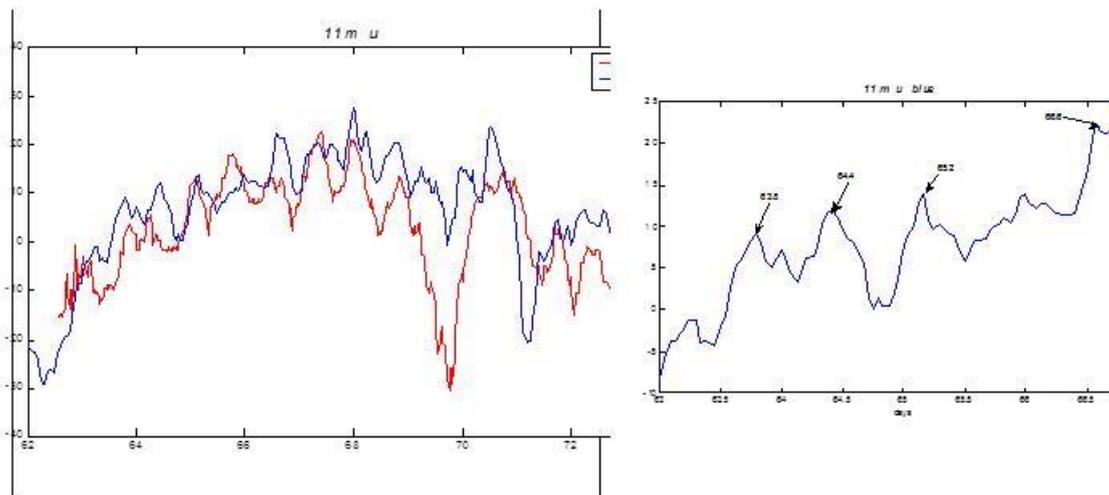


Рисунок 9.10 – Графики временной изменчивости составляющих U скорости течений на горизонте ~ 12 м, полученные в серии 6 по данным ADCP (красная линия) и AWAC (синяя линия) (adcp и **awac2014_0221-0404**). Отдельно представлен временной отрезок составляющих U, где отмечен цуг инерционных волн \ колебаний

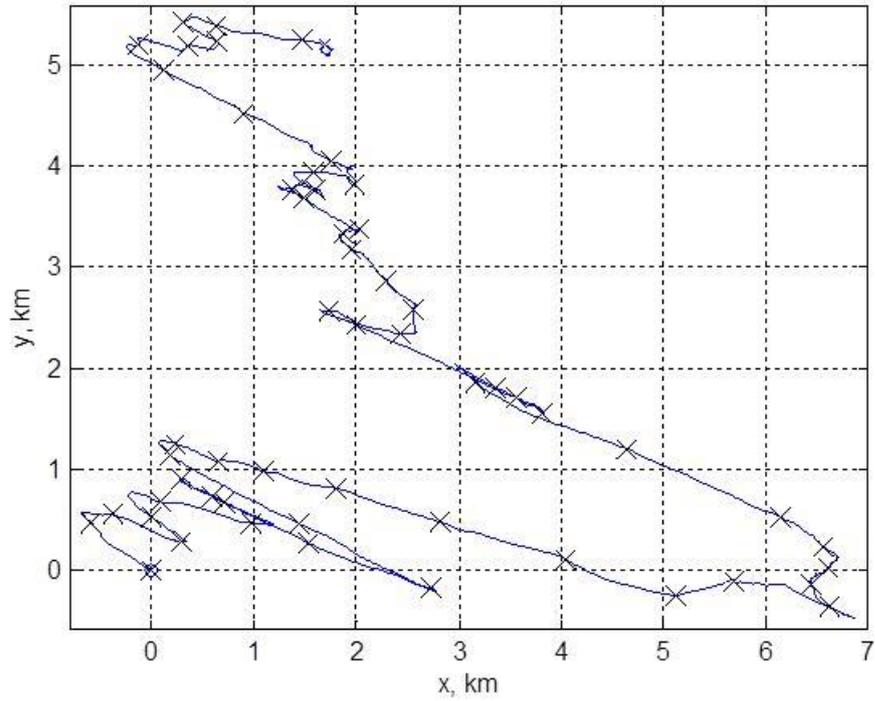


Рисунок 9.11 – Квази – годографы, полученные по данным AWAC в серии 6

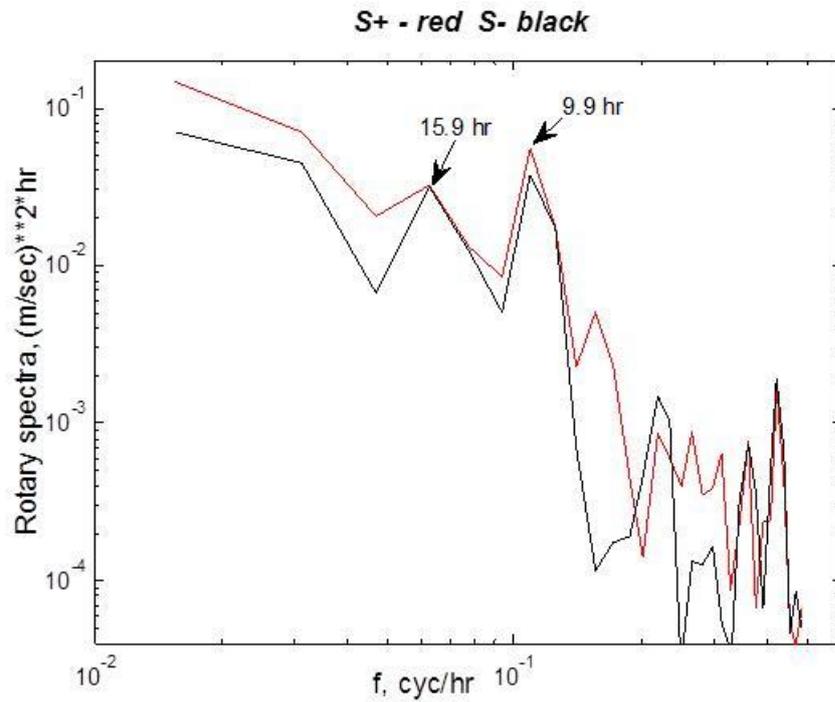


Рисунок 9.12 – Спектральные плотности вращательных составляющих скорости, полученные по данным AWAC в серии 6

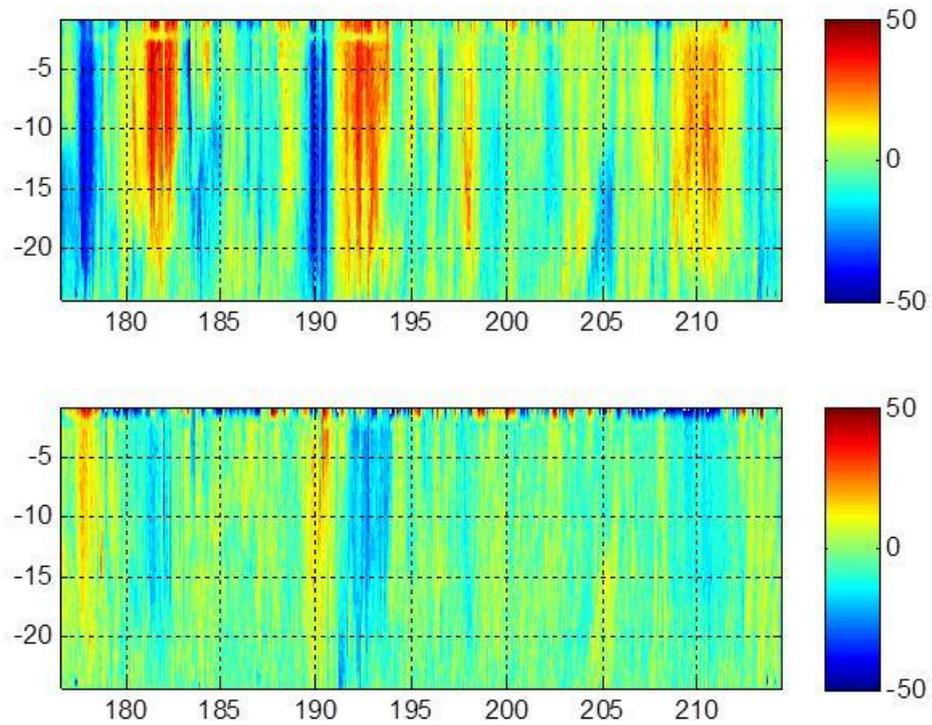


Рисунок 9.13 – Временные пространственные разрезы составляющих U и V скорости течений, полученные по данным **awac2014_0625-0803** (серия 8)

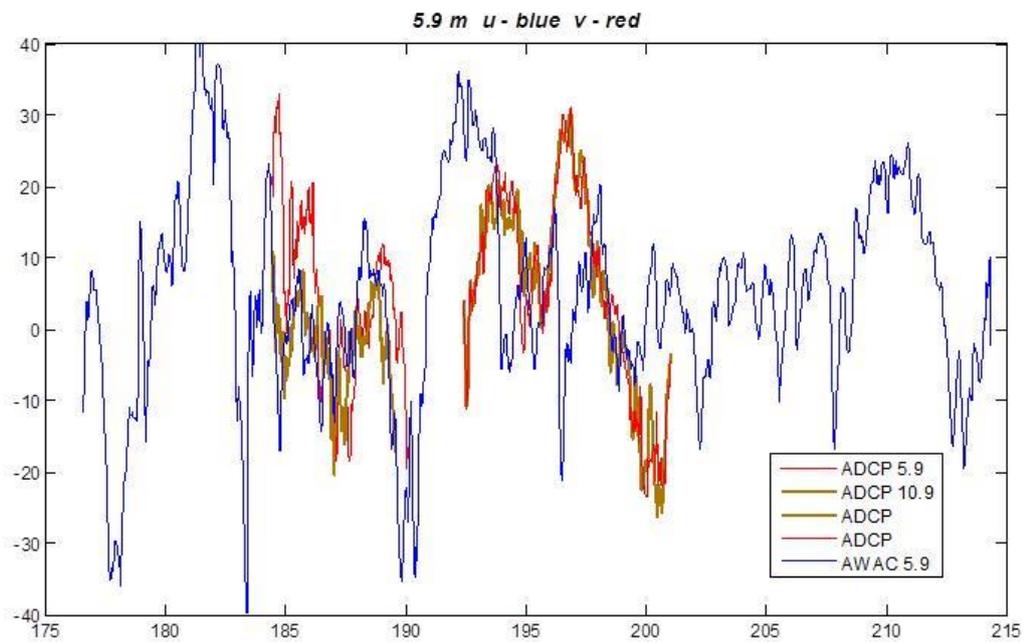


Рисунок 9.14 – Графики временной изменчивости составляющих U скорости течений на горизонте ~ 12 м, полученные в серии 6 по данным ADCP (красная линия) и AWAC (синия линия) (adcp и **awac2014_0625-0803**)

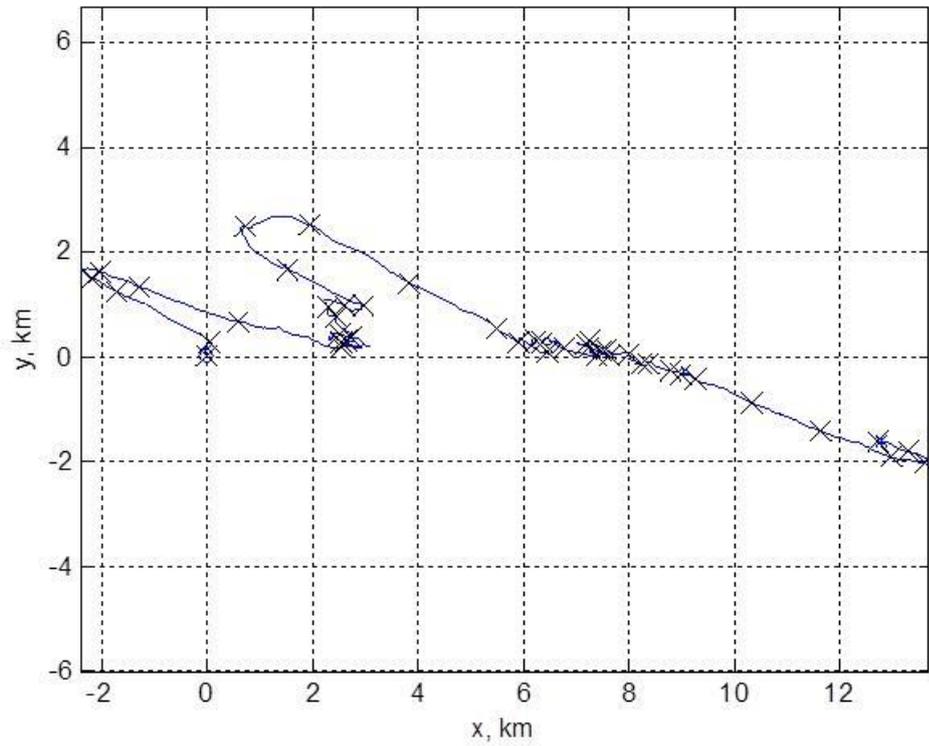


Рисунок 9.15 – Квази – годографы, полученные по данным AWAC в серии 8

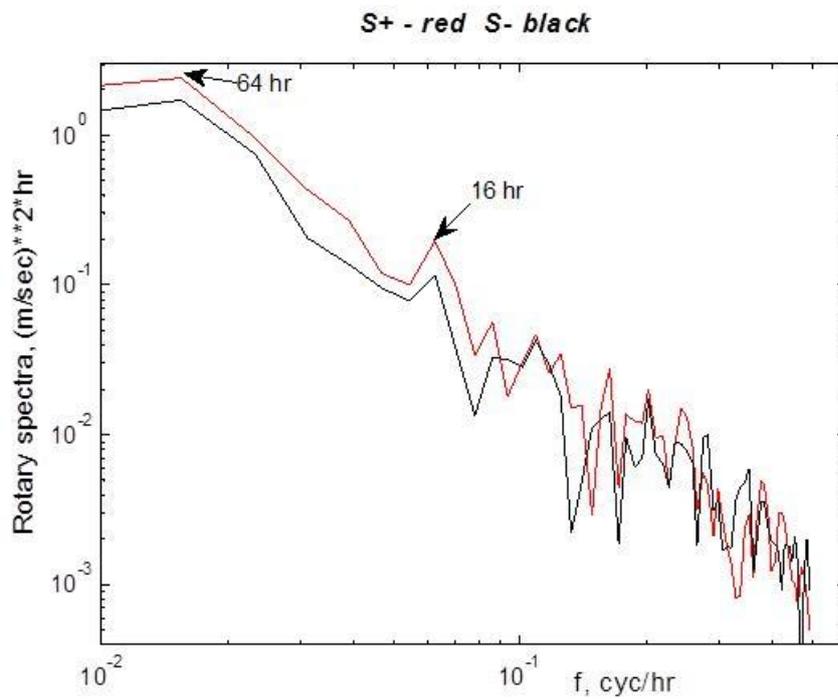


Рисунок 9.16 – Спектральные плотности вращательных составляющих скорости, полученные по данным AWAC в серии 8

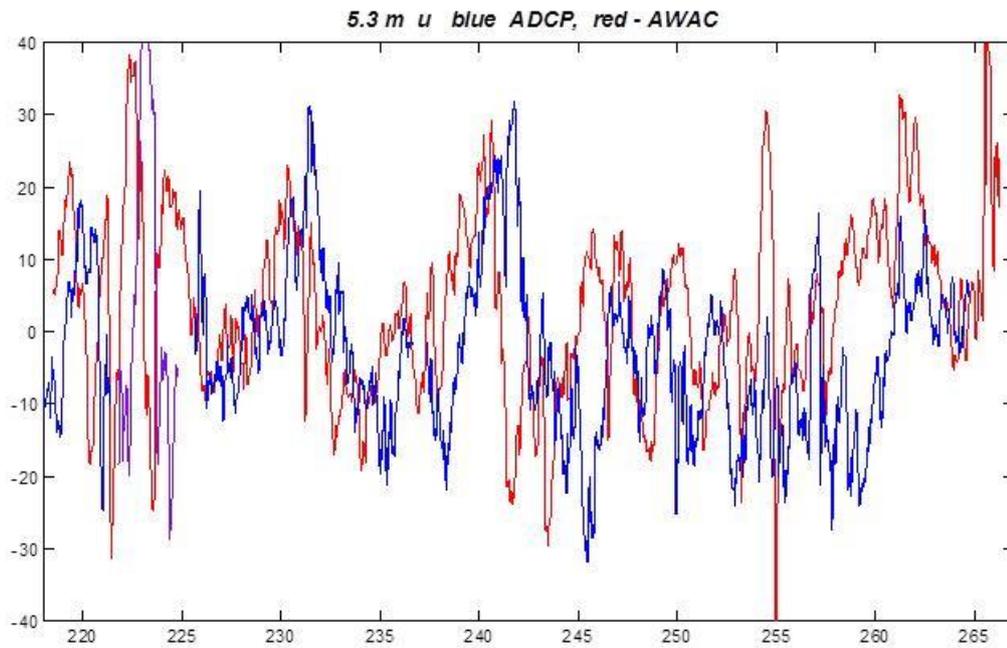


Рисунок 9.17 Графики временной изменчивости составляющих U скорости течений на горизонте ~ 5 м, полученные в серии 6 по данным ADCP (красная линия) и AWAC (синяя линия) (adcp и awac2014_0806-0923.dat, серия 9)

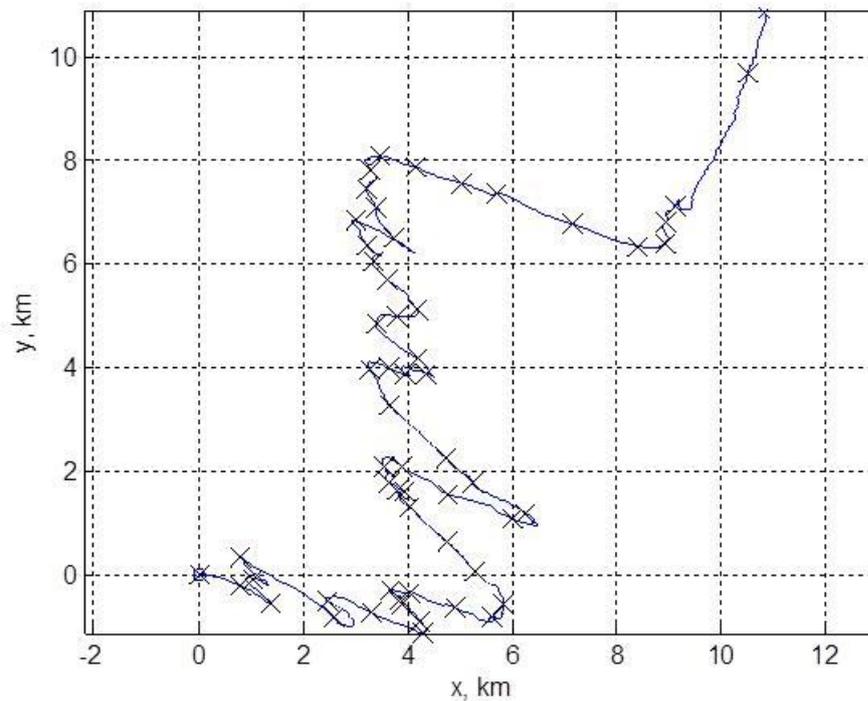


Рисунок 9.18 – Квази – годографы, полученные по данным AWAC в серии 9

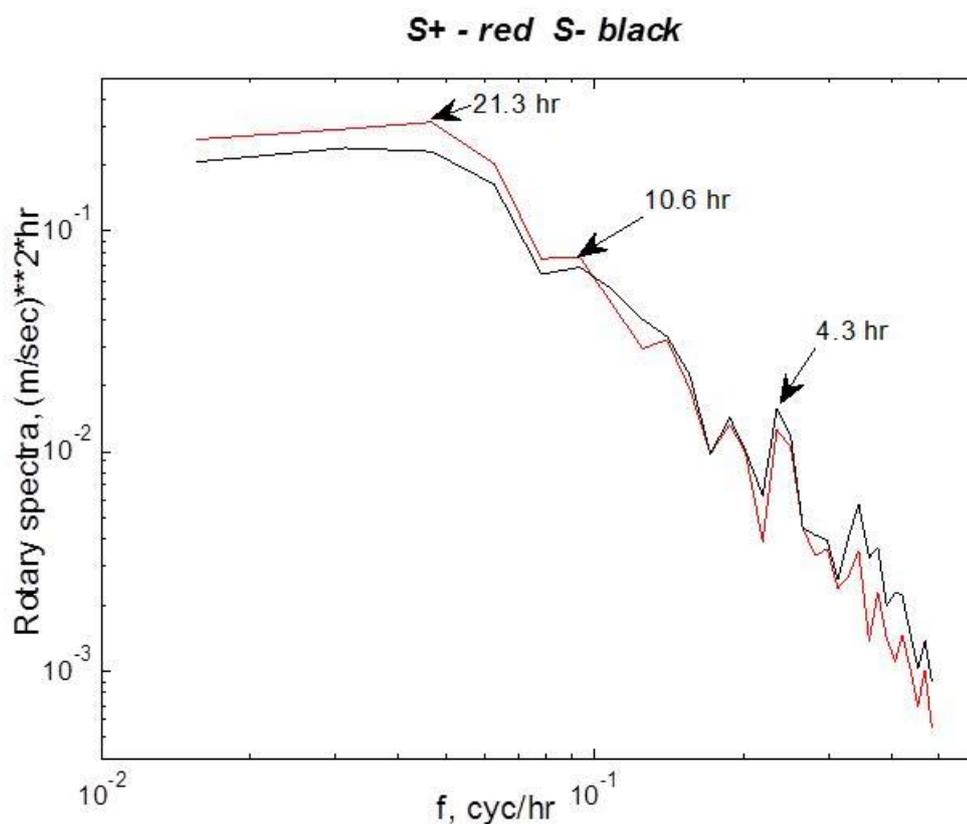


Рисунок 9.19 – Спектральные плотности вращательных составляющих скорости, полученные по данным AWAC в серии 9

3 Сезонный ход характеристик скорости течения по данным заякоренного зонда-профилографа «Аквалог» 2013-2014 гг.

В 2013-2014 гг. зонд-профилограф «Аквалог» был установлен в северо-восточной части Черного моря, возле Геленджика, в пяти милях от побережья на глубине порядка 250 м для долговременного мониторинга течений и термохалинной стратификации. После установки «Аквалог» собирал данные на протяжении 184 дней в 2013 г. и 188 дней в 2014 г., с перерывами от нескольких дней до месяцев для технического обслуживания. В среднем ежедневно измерялось 4 профиля, с глубины от 215-220 м до 15-30 м. В сумме было получено более 1000 вертикальных профилей с горизонтальными скоростями течений, обратным акустическим рассеиванием и сопутствующими STD-данными.

Чтобы выделить вдоль- и поперекбереговую компоненты течений, был проведен анализ данных, с поворотом системы координат на 180 градусов как по часовой стрелке, так и против, с шагом 1 градус, для поиска такого угла поворота системы координат, при котором средний модуль отношения восточной компоненты горизонтального течения к северной был бы минимальным. Для данных RDI ADCP, установленного на расстоянии 900

м от берега на глубине 22 м, этот угол был равен 50 градусов против часовой стрелки. Для «Аквалога» этот угол оказался равен 52 градуса против часовой стрелки.

Таким образом, после поворота системы координат на 52 градуса против часовой стрелки, северная компонента течения трансформировалась во вдольбереговую, где положительные значения означают направление на северо-запад, а отрицательные – на юго-восток. Восточная же компонента течения превратилась в поперекбереговую, с положительными значениями направленными к берегу, а отрицательными – в сторону открытого моря.

Для дальнейшего анализа горизонтальных течений вертикальный профиль был разбит на четыре части: от глубины 30 м до глубины 50 м, от 50 м до изопикны 14.9, от изопикны 14.9 до изопикны 15.9 и от изопикны 15.9 до глубины 215 м. Среднедневные значения компонент горизонтального течения показаны на рис. 9.20 (вдольбереговая компонента) и рис. 9.21 (поперекбереговая).

Среднедневные значения удельной энергии течения (квадрат скорости горизонтального течения) показаны на рис. 9.22.

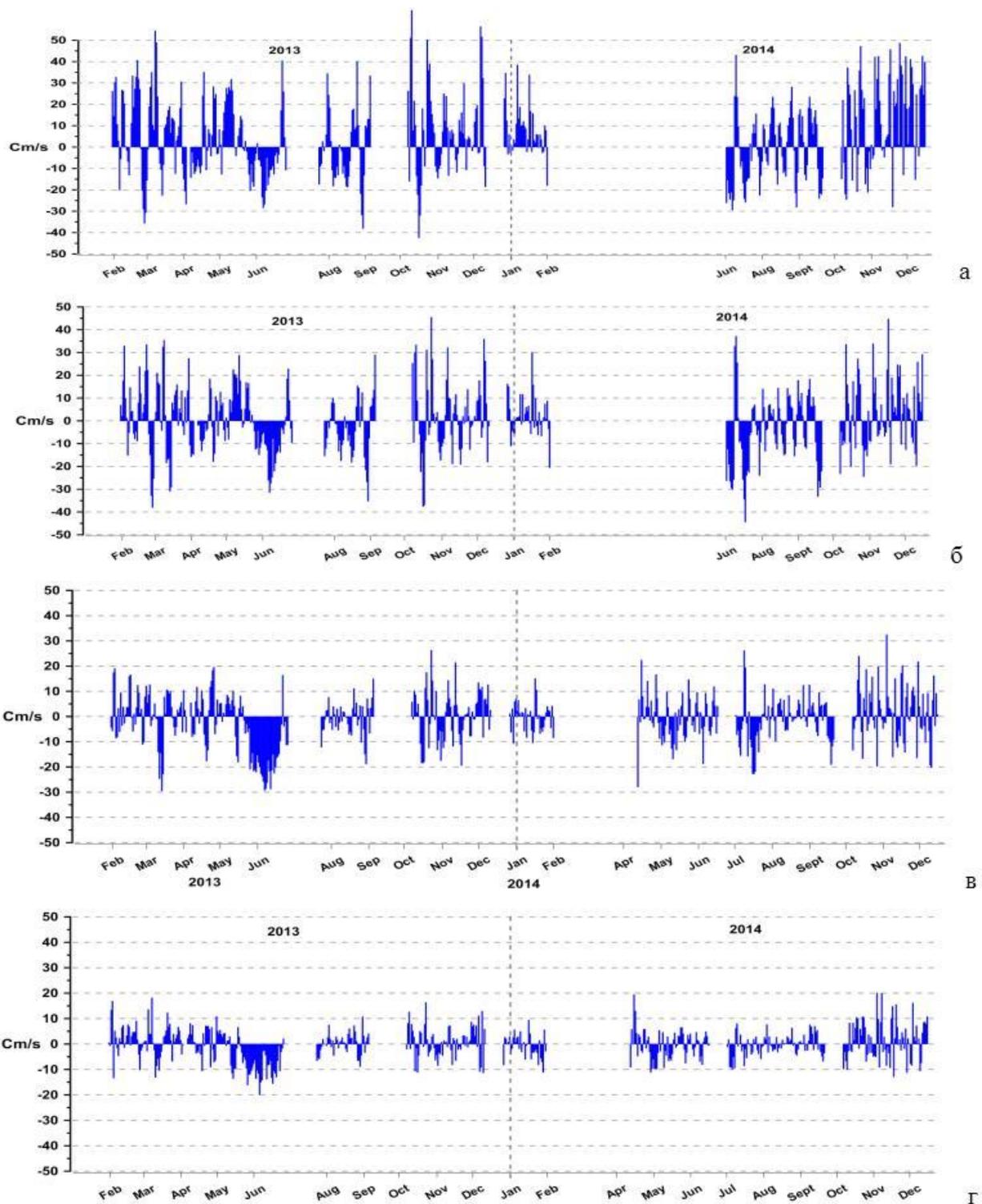
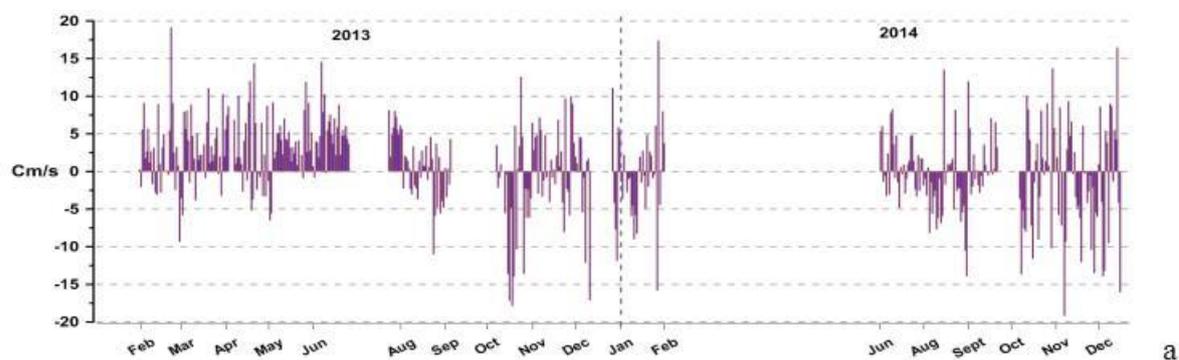
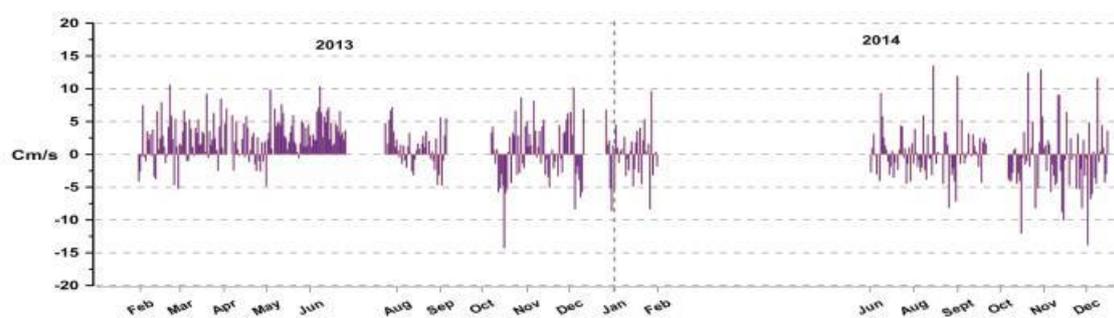


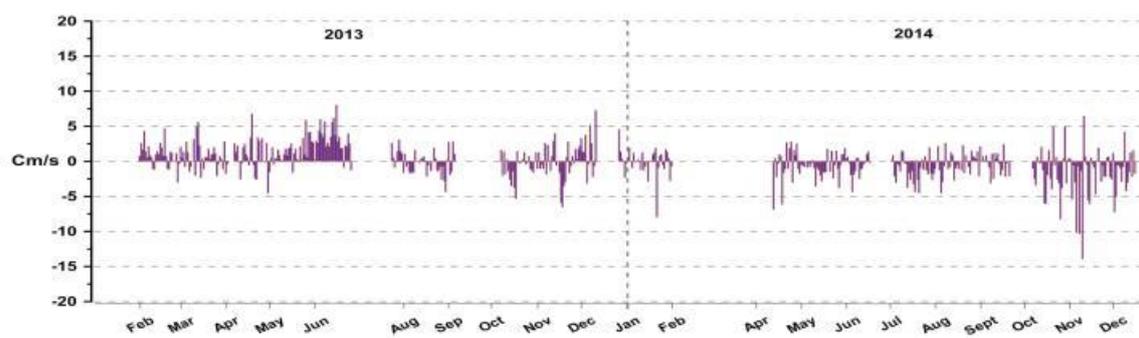
Рисунок 9.20 – Средняя за день скорость (см/с) вдольбереговой компоненты течения по данным заякоренного зонда-профилографа «Аквалог» в 2013-2014 гг.: *а* – слой 30-50 м; *б* – слой 50 м – изопикна 14,9; *в* – слой между изопикнами 14,9 – 15,9.; *г* – слой от изопикны 15,9 до глубины 215 м. Положительные значения означают вдольбереговое направление течения на северо-запад, отрицательные – на юго-восток



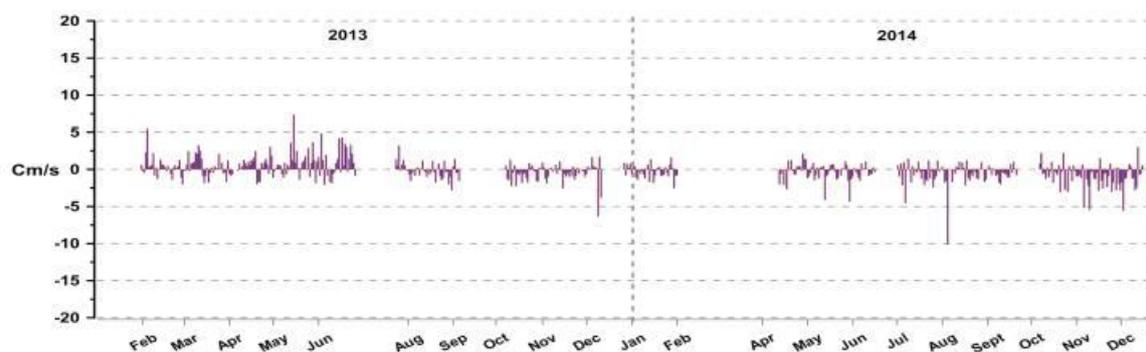
а



б



в



г

Рисунок 9.21 – Средняя за день скорость (см/с) поперекбереговой компоненты течения по данным заякоренного зонда-профилографа «Аквалог» в 2013-2014 гг.: *а* – слой 30-50 м; *б* – слой 50 м – изопикна 14.9; *в* – слой между изопикнами 14.9 – 15.9; *г* – слой от изопикны 15.9 до глубины 215 м. Положительные значения означают поперекбереговое направление течения в сторону берега, отрицательные – в сторону открытого моря

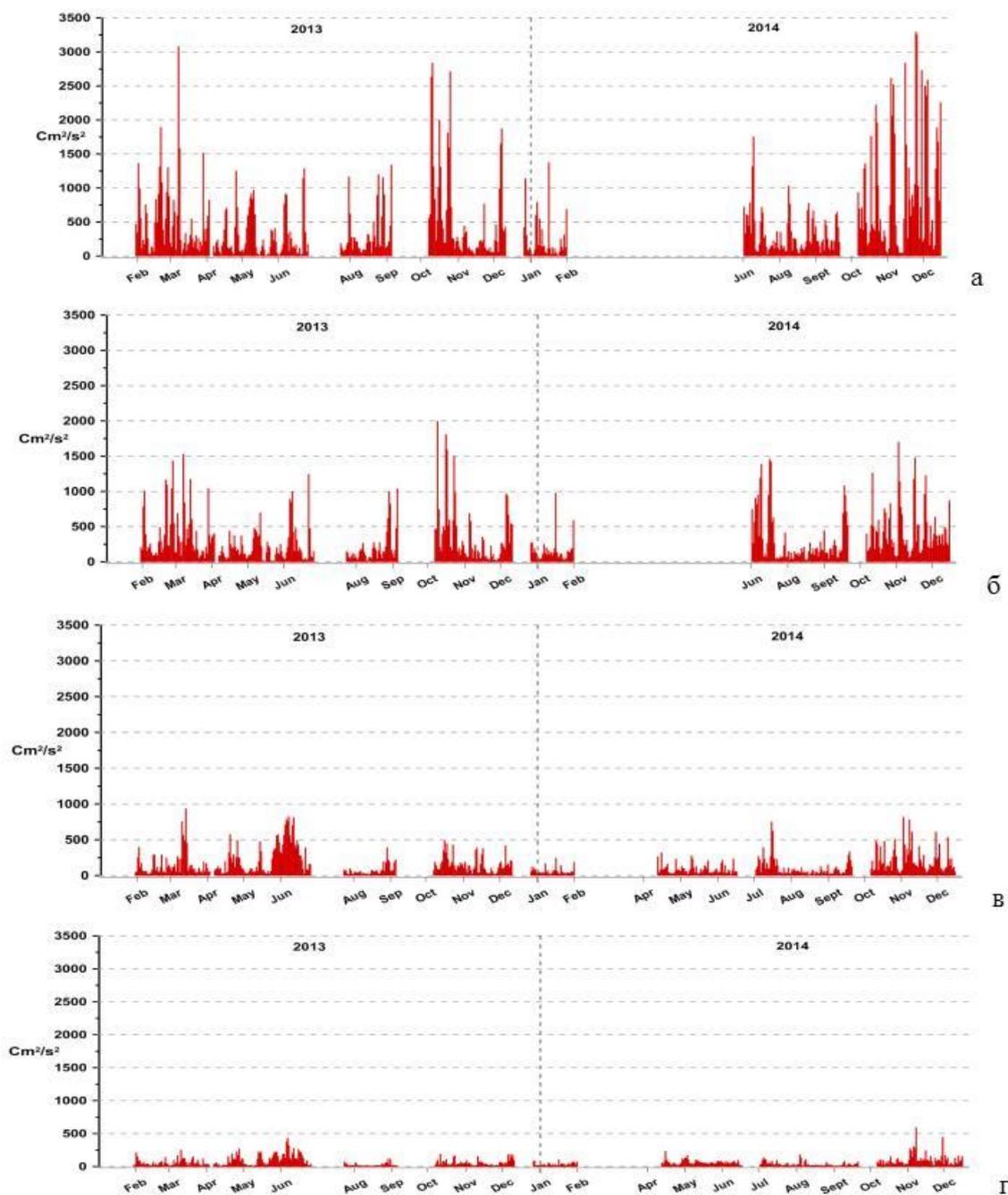


Рисунок 9.22 – Среднедневные значения удельной кинетической энергии течения (квадрат скорости горизонтального течения, $\text{см}^2/\text{с}^2$) по данным заякоренного зонда-профилографа «Аквалог» в 2013-2014 гг.: *а* – слой 30-50 м; *б* – слой 50 м – изопикна 14.9; *в* – слой между изопикнами 14.9 – 15.9; *г* – слой от изопикны 15.9 до глубины 215 м

Общая статистика средних скоростей течений по слоям приведена в таблице 9.6. Можно отметить, что для вдольбереговой компоненты течения общий тренд сохраняется во всем исследованном водном столбе, и в нижних слоях не возникает противотечение при положительном течении в верхних слоях и наоборот. Тем не менее, положительная

скорость вдольбереговой компоненты ослабевает сильнее в нижних слоях, чем отрицательная.

Таблица 9.6 – Средние значения вдоль- и поперекбереговой компонент скорости горизонтальных течений по данным заякоренного зонда-профилографа «Аквалог» в 2013-2014 гг. в отдельных слоях

Год	Компонента скорости течения	30-50 м, см/с	50 м – $\sigma_\theta=14.9$, см/с	$\sigma_\theta=14.9$ - 15.9, см/с	$\sigma_\theta=15.9$ - 215 м, см/с	30-215 м, см/с
2013	вдольбереговая	4.243	0.101	-1.824	-0.587	0.295
	поперекбереговая	1.514	1.673	0.704	0.179	0.874
2014	вдольбереговая	5.758	-0.471	-0.268	0.037	0.888
	поперекбереговая	-0.911	-0.271	-0.893	-0.591	-0.663
2013+2014 (среднее за два года)	вдольбереговая	4.874	-0.137	-1.057	-0.279	0.542
	поперекбереговая	0.504	0.863	-0.083	-0.201	0.234
Ср.- квадрат. отклонение	вдольбереговая	18.62	14.80	10.00	6.21	9.03
	поперекбереговая	6.38	4.07	2.46	1.48	2.08

В начале 2013 года поперекбереговая компонента была преимущественно направлена к берегу по всему исследованному слою воды. Во второй половине 2013 и 2014 гг. тренд был обратным, и течение было сильнее в сторону открытого моря.

В таблице 9.7 приведена общая статистика средних значений удельной кинетической энергии течения (квадрата общей скорости горизонтального течения, $\text{см}^2/\text{с}^2$).

Таблица 9.7 – Средние значения удельной кинетической энергии течения по данным заякоренного зонда-профилографа «Аквалог» в 2013-2014 гг. в отдельных слоях

Год	30-50 м, см ² /с ²	50 м $\sigma_\theta=14.9$, см ² /с ²	$\sigma_\theta=14.9-15.9$, см ² /с ²	$\sigma_\theta=15.9- 215$ м, см ² /с ²	30-215 м, см ² /с ²
2013	417.07	295.71	169.19	72.02	185.74
2014	548.63	329.44	129.08	65.21	206.63
2013+2014 (среднее за два года)	471.89	309.77	152.07	69.38	194.44
Ср.-квадрат. отклонение	590.99	334.70	158.18	67.07	171.37

10 УЧАСТИЕ В МЕРОПРИЯТИЯХ, НАПРАВЛЕННЫХ НА ОСВЕЩЕНИЕ И ПОПУЛЯРИЗАЦИЮ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ПНИ

Осуществлено участие в 14-й международной научно-технической конференции «Современные методы и средства океанологических исследований (МСОИ-2015, 19-21 мая, ИОРАН, Москва) со следующими докладами по теме ПНИ, опубликованными в сборнике материалов конференции, том 1 и 2.

1. Баранов В. И., Зацепин А. Г., Куклев С. Б., Подымов О. И., Очередник В. В. Кабельная система берегового мониторинга состояния водной среды в режиме реального времени – Т.1, С.14-16.
2. Сильвестрова К. П., Мысленков С. А., Зацепин А. Г., Краюшкин Е. В., Баранов В. И. Использование дрейфующих буев для исследования течений на шельфе Черного моря – Т.1, С.19-23.
3. Зацепин А. Г., Баранов В. И., Куклев С. Б., Мельников В. А., Пиотух В. Б., Подымов О. И., Сильвестрова К. П., Станичный С. В. Предварительные результаты исследования прибрежных апвеллингов и даунвеллингов на гидрофизическом полигоне ИО РАН в Черном море – Т.1, С.27-30.
4. Подымов О. И., Арашкевич Е. Г., Зацепин А. Г., Островский А. Г., Соловьев В. А., Куклев С. Б. Исследования горизонтальных течений, колебаний сероводородной границы и суточных миграций зоопланктона в северо-восточной части Черного моря на базе долговременных наблюдений с использованием автономного зонда-профилографа «Аквалог» - Т.1, С. 34-38.
5. Зацепин А. Г., Баранов В. И., Куклев С. Б., Мельников В. А., Пиотух В. Б., Сильвестрова К. П. Интеркалибрация акустических доплеровских профилографов течения и других измерителей на гидрофизическом полигоне ИОРАН – Т. 1, С.172-176.
6. Волков С.В., Ольшанский В.М., Островский А.Г. Технология предсказуемого источника тока автономного необитаемого подводного аппарата – Т.2, С.88-92.
7. Островский А.Г., Швоев Д.А. Разработка системы изменения плавучести профилирующих зондов и автономных необитаемых подводных аппаратов. – Т.2, С.127-131.

Участником коллектива ПНИ Костылевой А. В., 12 мая 2015 г. защищена диссертация «Распределение растворенного органического углерода в северо-восточной части Черного моря» на соискание ученой степени кандидата географических наук по специальности 25.00.28 – Океанология.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнен анализ спутниковой информации и метеорологических данных для северо-восточной части Черного моря. Подготовлены массивы спутниковых и метеорологических данных для северо-восточной части Черного моря для их последующего анализа. На основе анализа подготовленных массивов спутниковых данных оценена информативность температурного и двух оптических (хлорофилл_a и взвесь) каналов сканеров MODIS-Aqua и MODIS-Terra с в различные с точки зрения измерения соответствующих параметров, а также возможности выделения динамических структур. С использованием метеорологических данных, определены температурные тренды воздушной среды в черноморском регионе с 1935 г. по н.в. Установлено, что среднезимняя температура за последние 25 лет выросла более, чем на 2 °С. Вследствие этого уменьшился уровень зимнего выхолаживания водной среды и стал исчезать холодный промежуточный слой Черного моря в его классическом определении (между изотермами 8 °С).

Проведена предварительная обработка данных многоканальных оптико-электронных спутниковых сканеров SEVIRI (MSG) - температура, TIRS (Landsat) - температура и MODIS-Aqua – хлорофилл «а» и получен массив расчетных значений температуры поверхности моря и концентрации хлорофилла «а» на регулярной сетке. Для данных SEVIRI – сетка с шагом 4 км, для данных TIRS – 100 м, для данных MODIS-Aqua – 1.1 км.

Подготовлены данные и выполнен анализ распределений ключевых параметров водной среды на акватории подспутникового полигона и их сезонной и межгодовой изменчивости по результатам натурных исследований. К этим параметрам относятся: температура и соленость верхнего квазиоднородного слоя моря (ВКС), толщина ВКС, толщина сезонного термоклина, минимальная температура холодного промежуточного слоя (ХПС), толщина ХПС и ряд других.

Проведен анализ изменчивости параметров температуры поверхности моря (ТПМ) и разработана методика учета дневного хода температуры по данным сканера SEVIRI. Полученные результаты будут использованы при интерпретации и коррекции данных несинхронных натурных и контактных измерений с учётом изменчивости в цикле дневного прогрева, а также для коррекции потоков тепла на границе океан - атмосфера в объединённых атмосферных и гидродинамических моделях.

Подготовлены материалы для валидации регионального алгоритма восстановления концентрации хлорофилла «а» на основе сопоставления спутниковых данных и натурных измерений. Проведена успешная валидация регионального алгоритма на основе

сопоставления с данными натурных измерений, не использовавшихся для разработки алгоритма.

Выполнены численные расчеты циркуляции вод Черного моря с улучшенным разрешением у побережья Геленджика в районе полигона ИОРАН и проведена их предварительная верификация на основе сопоставления с данными измерений и спутниковой информацией. Сравнение результатов расчётов с данными измерений и спутниковой информацией показало их удовлетворительное соответствие друг другу. Тем не менее, для получения более высокой степени соответствия требуются дальнейшие усовершенствования моделей, такие как настройка коэффициентов вертикального турбулентного обмена и использование данных атмосферного воздействия с более высоким пространственно-временным разрешением.

Разработана схема функциональной структуры системы мониторинга экологического состояния водной среды шельфа Черного моря на основе интеграции спутниковой информации, данных контактных измерений и результатов численного моделирования. Схема отчетливо показывает взаимодействие различных организационных, научных и вспомогательных структур участвующих в осуществлении мониторинга, а также порядок интеграции данных контактных и дистанционных наблюдений и их совместного использования с результатами численного моделирования для выработки диагноза и прогноза состояния водной среды и выпуска соответствующих информационных материалов.

Проведены подготовительные мероприятия, по приобретению вычислительной техники для математического моделирования, обработки и анализа данных спутниковых и подспутниковых наблюдений (работа Индустриального партнера). Подготовлено обоснование отказа по приобретению акустического измерителя скорости течения для оснащения зонда-профилографа «Аквалог» на заякоренной автономной станции, в связи с тем, что его рублевая цена практически удвоилась со времени начала работа по проекту. Показано, что данное обстоятельство не повредит выполнению ПНИ и достижению ее основных целей.

Проведен анализ результатов контактных измерений с помощью автономных измерительных комплексов на подспутниковом полигоне в шельфово-склоновой зоне Черного моря. Проведена инвентаризация выполненных измерений ключевых параметров водной среды с помощью судовых средств и автономных измерительных комплексов на подспутниковом полигоне в шельфово-склоновой зоне Черного моря на втором этапе выполнения ПНИ. Данные представлены в виде таблиц, в которых перечислены виды

измерений, а также приведены сроки и указаны географические координаты их выполнения.

Результаты 2-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 2-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 2-го этапа решены полностью, в соответствии с Техническим заданием и Планом-графиком Соглашения о предоставлении субсидии.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Donlon C. et al. The global ocean data assimilation experiment high-resolution sea surface temperature pilot project //Bulletin of the American Meteorological Society. – 2007. – Т. 88. – №. 8. – С. 1197-1213.
- 2 Gentemann C. L. et al. Multi-satellite measurements of large diurnal warming events //Geophysical Research Letters. – 2008. – Т. 35. – №. 22. – С. L22602.
- 3 Marullo S. et al. A diurnal-cycle resolving sea surface temperature product for the tropical Atlantic //Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012). – 2010. – Т. 115. – №. C5.
- 4 Merchant C. J. et al. Diurnal warm-layer events in the western Mediterranean and European shelf seas //Geophysical Research Letters. – 2008. – Т. 35. – №. 4. – С. L04601.
- 5 Filipiak M. J. et al. An empirical model for the statistics of sea surface diurnal warming //Ocean Science. – 2012. – Т. 8. – №. 2. – С. 197-209.
- 6 Walton C. C. et al. The development and operational application of nonlinear algorithms for the measurement of sea surface temperatures with the NOAA polar-orbiting environmental satellites //Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012). – 1998. – Т. 103. – №. C12. – С. 27999-28012.
- 7 Merchant C. J. et al. Sea surface temperature from a geostationary satellite by optimal estimation //Remote Sensing of Environment. – 2009. – Т. 113. – №. 2. – С. 445-457.
- 8 Le Borgne P., Roquet H., Merchant C. J. Estimation of Sea Surface Temperature from the Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager, improved using numerical weather prediction //Remote Sensing of Environment. – 2011. – Т. 115. – №. 1. – С. 55-65.
- 9 Saunders P. M. The temperature at the ocean-air interface //Journal of the atmospheric sciences. – 1967. – Т. 24. – №. 3. – С. 269-273.
- 10 Монин А. С., Красицкий В. П. Явления на поверхности океана. – Гидрометеоиздат, 1985.
- 11 <http://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/OSDPD-L2P-MSG02>.
- 12 Parkinson C. L., Ward A., King M. D. Earth science reference handbook. A guide to NASA's Earth science program and earth observing satellite missions //National Aeronautics and Space Administration. – 2006. – С. 277.
- 13 Merchant C. J. et al. Probabilistic physically based cloud screening of satellite infrared imagery for operational sea surface temperature retrieval //Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 2005. – Т. 131. – №. 611. – С. 2735-2755.
- 14 Schmetz J. et al. An introduction to Meteosat second generation (MSG) //Bulletin of the American Meteorological Society. – 2002. – Т. 83. – №. 7. – С. 977-992.

- 15 Marchuk G.I., Paton B.E. The Black Sea as a simulation ocean model // Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling. 2012. V. 27. № 1, P. 1-4.
- 16 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. 629-642.
- 17 Демьшев С.Г., Дымова О.А. Численный анализ мезомасштабных особенностей циркуляции в прибрежной зоне Черного моря // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49, № 6. С. 655-663.
- 18 Кордзадзе А.А., Деметрашвили Д.И. Краткосрочный прогноз гидрофизических полей в восточной части Черного моря // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49, № 6. С. 733-745.
- 19 Агошков В.И., Пармузин Е.И., Шутяев В.П. Ассимиляция данных наблюдений в задаче циркуляции Черного моря и анализ чувствительности ее решения // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49. № 6. С. 643-654.
- 20 Коротаев Г.К., Кныш В.В., Кубряков А.И. Исследование процессов формирования холодного промежуточного слоя по результатам реанализа гидрофизических полей Черного моря за 1971-1993 гг // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50, № 1. С. 41-56.
- 21 Stanev E.V. Understanding Black Sea dynamics // Oceanography. 2005. V. 18. № 2. P. 56-75.
- 22 Kordzadze A.A., Demetrashvili D.I. Operative forecast of hydrophysical fields in the Georgian Black Sea coastal zone within the ECOOP // Ocean Sci. 2011. V. 7, № 6, P. 793-803.
- 23 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. V. 7, № 5. P. 629-649.
- 24 Zalesny V.B., Diansky N.A., Fomin V.V., Moshonkin S.N., Demyshev S.G. Numerical model of the circulation of the Black Sea and the Sea of Azov // Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling. 2012. V. 27. № 1. P. 95-111.
- 25 Korotaev G.K., Saenko O.A., Koblinsky C.R. Satellite altimetry observations of the Black Sea level // Journal Geoph. Res. 2001. V. 106. № C1. P. 917-933
- 26 Stanev E.V. Stanev E.V., Le Traon P.Y., Peneva E.L. Sea level variations and their dependency on meteorological and hydrological forcing: Analysis of altimeter and surface data for the Black Sea // J. Geophys. Res. 2000. V. 105. P. 17,203–17,221.

- 27 Lyubartseva S.P., Ivanov V.A., Bagaev A.V., Demyshev S.G., V.B. Zalesny V.B. Three-dimensional numerical model of polychlorobiphenyls dynamics in the Black Sea // Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling. 2012. V. 27. № 1. P. 53-68.
- 28 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.
- 29 Зацепин А.Г., Островский А.Г., Кременецкий В.В. и др. О природе короткопериодных колебаний основного черноморского пикноклина, субмезомасштабных вихрях и реакции морской среды на катастрофический ливень 2012 г // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49, № 6. С. 717-732.
- 30 Зацепин А.Г., Островский А.Г., Кременецкий В.В. и др. Подспутниковый полигон для изучения гидрофизических процессов в шельфово-склоновой зоне Черного моря // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50, № 1. С. 16-29.
- 31 Иванов В.А. Пространственно-временная изменчивость и мониторинг гидрофизических процессов в шельфово-склоновой зоне Черного моря // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50, № 1. С. 30-40.
- 32 Зацепин А.Г., Корж А.О., Кременецкий В.В. и др. Изучение гидрофизических процессов на шельфе и верхней части континентального склона Черного моря с использованием традиционных и новых методов измерений // Океанология. 2008. Т. 48. № 4. С. 510-519.
- 33 Зацепин А.Г., Кондрашев А.А., Корж А.О., Кременецкий В.В. и др. Субмезомасштабные вихри на кавказском шельфе Черного моря и порождающие их механизмы // Океанология. 2011. Т. 51. № 4. С. 592-605.
- 34 Голицын Г.С. О природе спиральных вихрей на поверхности морей и океанов // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48, № 3, С. 391–395.
- 35 Zalesny V.B., Marchuk G.I., Agoshkov V.I., Bagno A.V., Gusev A.V., Diansky N.A., Moshonkin S.N., Tamsalu R., Volodin E.M. Numerical simulation of large-scale ocean circulation based on the multicomponent splitting method // Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling. 2010. V. 2. No 6. P. 581-609.
- 36 Залесный В.Б., Гусев А.В., Мошонкин С.Н. Численная модель гидродинамики Черного и Азовского морей с вариационной инициализацией температуры и солёности // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49, № 6. С. 699-716.
- 37 Marchuk G.I. Splitting and alternative direction methods // Handbook of Numerical Analysis / Ed. Ciarlet P.G., Lions J.L. Amsterdam: North-Holland, 1990. V. 1. P. 197-462.

38 IOC, IHO and BODC, 2003. Centenary Edition of the GEBCO Digital Atlas, published on CD-ROM on behalf of the Intergovernmental Oceanographic Commission and the International Hydrographic Organization as part of the General Bathymetric Chart of the Oceans, British Oceanographic Data Centre, Liverpool, U.K.

39 Belokopytov V.N. Ocean Station Tool: Software package for processing and analysis of oceanographic data // International Marine Data and Information Conference – IMDIC (May, 31 – June 3, 2005). Abstracts. – Brest, France, 2005. – P.67.

40 Pacanovsky R.C., Philander G. Parameterization of vertical mixing in numerical models of the tropical ocean // J. Phys. Oceanogr. 1981. V. 11. P. 1442 – 1451.

41 Дианский Н.А., Фомин В.В., Жохова Н.В., Коршенко А.Н. Расчет течений и распространения загрязнения в прибрежных водах Большого Сочи // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49. № 6. С. 664-675.

42 Thomas L.N., Tandon A., Mahadevan A. Submesoscale processes and dynamics // Ocean modeling in an eddying regime / Ed. Hecht M.W., Hasumi H. Washington DC: American Geophysical Union. 2008. P. 17-38.

43 Залесный В.Б., Ивченко В.О. Влияние аномальных режимов Южного океана на динамику экваториальных вод // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41. № 3. С. 341-359.

44 Зацепин А.Г., Баранов В.И., Кондрашов А.А., Корж А.О., Кременецкий В.В., Островский А.Г., Соловьев Д.М. Субмезомасштабные вихри на кавказском шельфе Черного моря и порождающие их механизмы. Океанология, 2011, том 51, № 4, с. 592–605.

45 Зацепин А.Г., Пиотух В.Б., Корж А.О., Куклева О.Н., Соловьев Д.М. Изменчивость поля течений в прибрежной зоне Черного моря по измерениям донной станции ADCP // Океанология, том 52, №5, 2013, стр. 629-642.