ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ОКЕАНОЛОГИИ ИМ. П.П. ШИРШОВА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИО РАН)

УДК 556.5.04/08
Рег. № НИОКТР 121112500166-8

УТВЕРЖДАЮ
Директор ИО РАН
_____ А.В. Соков
«___»_____2022 г.

ОТЧЕТ

О НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВОД ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЫ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО ШЕЛЬФА ЧЕРНОГО МОРЯ В РАМКАХ УЧАСТИЯ В МЕЖДУНАРОДНОМ ПРОЕКТЕ DOORS

(промежуточный, этап 2)

Соглашение № 075-15-2021-941 от 30.09.2021 г.

Руководитель НИР
зам. директора,
член-корреспондент РАН,
д-р геогр. наук _____ П.О. Завьялов

Москва 2022

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель НИР, член-корреспондент РАН, д-р геогр. наук	_____ подпись, дата	П.О. Завьялов (введение, заключение, разделы 1, 3, 4)
Исполнители:		
Младший научный сотрудник	_____ подпись, дата	Н.Ю. Андрулионис (раздел 1)
Зав. лабораторией, член-корр. РАН	_____ подпись, дата	С.К. Гулев (раздел 1)
Ведущий научный сотрудник	_____ подпись, дата	Б.В. Дивинский (раздел 1)
Ведущий инженер	_____ подпись, дата	И.Б. Завьялов (разделы 1, 2)
Научный сотрудник, канд. геогр. наук	_____ подпись, дата	А.С. Ижицкий (раздел 3)
Старший научный сотрудник, канд. биол. наук	_____ подпись, дата	Б.В. Коновалов (раздел 2)
Главный научный сотрудник, д-р физ.-мат. наук	_____ подпись, дата	А.Г. Костяной (разделы 2, 3)
Научный сотрудник	_____ подпись, дата	Е.А. Костяная (раздел 2)
Ведущий научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук	_____ подпись, дата	В.В. Кременецкий (раздел 3)
Директор Южного отделения ИО РАН, канд. геогр. наук	_____ подпись, дата	С.Б. Куклев (раздел 2)
Старший научный сотрудник, канд. биол. наук	_____ подпись, дата	С.А. Мошаров (разделы 1-4, заключение, Приложение А)
Научный сотрудник	_____ подпись, дата	А.А. Недоспасов (раздел 3)
Зав. лабораторией, д-р геол.-мин. наук	_____ подпись, дата	И.А. Немировская (разделы 2, 3)
Инженер	_____ подпись, дата	М.О. Новиков (разделы 1, 2)
Ведущий научный сотрудник, д-р физ.-мат. наук	_____	А.А. Осадчиев (разделы 1, 3-5, 7)

подпись, дата

Младший научный сотрудник	_____ подпись, дата	В.В. Очередник (разделы 4, 5)
Научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук	_____ подпись, дата	В.В. Пелевин (разделы 3-5, 7)
Ведущий инженер	_____ подпись, дата	С.А. Рождественский (разделы 1, 2, 6)
Старший научный сотрудник, канд. биол. наук	_____ подпись, дата	Ф.В. Сапожников (разделы 3-5, 7)
Научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук	_____ подпись, дата	Р.О. Седаков (разделы 4-6)
Старший научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук	_____ подпись, дата	И.В. Серых (раздел 2, 6, 7)
Старший научный сотрудник, канд. геогр. наук	_____ подпись, дата	А.С. Фалина (разделы 5-7)
Младший научный сотрудник	_____ подпись, дата	А.В. Храмцова (разделы 1, 4, 6)
Ведущий научный сотрудник, канд. геогр. наук	_____ подпись, дата	В.К. Часовников (раздел 1, 4, 6, 7)
Нормоконтроль	_____ подпись, дата	С.А. Мошаров

РЕФЕРАТ

Отчет 176 с., 1 кн., 98 рис., 23 табл., 55 источн.

ЧЕРНОЕ МОРЕ, НАТУРНЫЕ ДАННЫЕ, ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ РЕЖИМ, ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ, АНТРОПОГЕННЫЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ, СОЦИАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА, МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО

Работа в рамках проекта состояла из натурных исследований, численного моделирования, а также социально-ориентированных исследований. Разработаны модифицированные модели: гидродинамическая BSAS12 с повышенным пространственным разрешением и адаптированная биогеохимическая BROM. Проведены исследования влияния изменений климата в черноморском регионе на развитие прибрежного туризма, определены потенциально влияющие на развитие отрасли климатические факторы, такие как общее повышение температуры воды в летний сезон и увеличение продолжительности апвеллингов. Мониторинговые исследования в показали повышенный уровень загрязнения вод Геленджикской и Голубой бухт нефтепродуктами, фенолом, железом и марганцем. Превышения допустимых концентраций в донных отложениях установлены для нефтепродуктов и пестицидов, причем содержание углеводородов зависит от их гранулометрического типа. Концентрации АУВ и ПАУ у северо-восточного побережья Черного моря значительно превосходят фоновые величины. Состав ПАУ, как более устойчивого углеводородного класса, во взвеси и особенно в донных осадках указывает на смешанных генезис полиаренов: нефтяной и пирогенный. В результате численного моделирования: показано отсутствие значительной сезонной изменчивости потока растворенных загрязняющих веществ через Керченский пролив в Черное море, установлены условия образования речного плюма с загрязняющими веществами вдоль побережья, параметризировано ускорение погружения частиц взвеси при осаждении окисленного марганца, рассмотрены сценарии распространения взвеси при различных гидометеорологических условиях. Создана и протестирована онлайн-платформа System of Systems, которая будет собирать, интегрировать, предоставлять свои данные и наблюдения и предлагать специализированные услуги и продукты сообществам заинтересованных сторон Черноморского бассейна. Полученные результаты могут использоваться в практической деятельности предприятий, осуществляющих морскую деятельность в причерноморском регионе РФ.

Работы иностранного партнера включали в себя характеристику типов черноморских вод по оптическим характеристикам по результатам статистического кластерного анализа, исследования изменений морфологии береговой линии и процессов переноса взвешенного материала, разработку алгоритмов для оптимизации использования

данных спутникового альтиметра CMEMS, конфигурированиея модельной и измерительной компонент оценки климатических изменений и их влияния на Черное море, а также исследование регуляторных функций экосистемы и состояния биоразнообразия ключевых бентосных сообществ – моллюсков Phyllophora исообществ мягких донных грунтов под воздействием речных плюмов.

Содержание

ВВЕДЕНИЕ 8

1 Проведение комплексных мониторинговых исследований состояния морской среды в прибрежной зоне Чёрного моря от Керченского пролива до г. Сочи, а также гидрофизической и гидробиологической обстановки в прибрежной зоне в контексте антропогенной нагрузки и с учётом происходящих климатических изменений 11

2 Валидация модифицированной модели BSAS12 и проведение с ее помощью численных экспериментов по воспроизведению мезомасштабной структуры циркуляции в российском секторе моря и переноса загрязнений в различных условиях атмосферного форсинга и материкового стока 103

3 Определение характерных схем переноса морской взвеси и загрязнений в приустьевых акваториях малых рек российского черноморского побережья для различных типов ветрового воздействия с помощью модели STRiPE. 124

4 Моделирование гидрохимического режима и кислородного режима моря с помощью биогеохимической модели BROM 147

5 Исследование характеристик ветрового волнения и его влияния на перенос загрязнений с помощью волновой модели MIKE21SW 153

6 Информирование научного сообщества и общественности о ходе проекта. Проведение опросов «стейкхолдеров» (заинтересованных организаций и предприятий) региона и анализ проведенных опросов. 165

7 Подготовка по результатам реализации проекта материалов не менее 4 статей для их публикации в научных журналах, индексируемых в базах данных "Scopus" и (или) Web of Science Core Collection 177

2.8 Работы Иностранного партнера, выполняемые за счет средств из внебюджетных источников 180

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 183

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящем отчете о НИР применяют следующие термины с соответствующими определениями, сокращения и обозначения:

Валидация	процесс определения точности, воспроизводимости, чувствительности, устойчивости и других метрологических характеристик
Лидар	прибор для получения и обработки информации об удаленных объектах с помощью активных оптических систем
Разрез (океанологический)	ряд океанологических станций, расположенных по определенному направлению, преимущественно по прямому курсу судна.
Реанализ	ретроспективный анализ гидрометеорологических данных за предыдущие десятилетия с помощью математических моделей с целью анализа и прогноза
Речной плюм	линзовидное тело речной воды на поверхности вод принимающего бассейна (озера, моря) напротив устья реки, обособленное вследствие разницы солености, температуры, количества взвешенного вещества
Рометр	прибор для измерения спектральной яркости восходящего излучения моря
СВЧ	сверхвысокие частоты
Спектральная яркость моря	яркость морской поверхности в разных зонах спектра электромагнитных волн видимого, ближнего и среднего инфракрасных диапазонов
Термохалинная структура	структура водной толщи по показателям температуры и солености
ТЗ	техногенное загрязнение
УВ	углеводороды
Фронтальная зона	зона раздела водных масс, резко различающихся по гидрофизическим параметрам (температура, соленость, плотность)
ADCP	профилограф скорости течений (Acoustical Doppler Current Profiler)
CTD-зонд	приборный комплекс с датчиками проводимости (conductivity), температуры (temperature) и глубины (depth), являющийся стандартным океанологическим средством измерения

ВВЕДЕНИЕ

Объектом исследований в рамках проекта является состояние морской среды в прибрежной зоне Черного моря от Керченского пролива до г. Сочи, а также гидрофизическая и гидробиологическая обстановка в прибрежной зоне в контексте антропогенной нагрузки и с учетом происходящих климатических изменений.

Цель работы: комплексные мониторинговые исследования процессов, формирующих экологическое состояние морской среды в прибрежной зоне российского сектора Черного моря.

Задачи 2-го этапа:

- Выполнение комплексных мониторинговых исследований в соответствии с требованиями пп. 4.1.2 и 4.1.3 Плана работ научного исследования. Описание особенностей состава алифатических и полициклических ароматических углеводородов, включая описание особенностей их трансформации и соотношения природной и антропогенной составляющих. Описание видового состава обрастаний на морском пластике. Описание свойств внутренних волн по данным измерений кластеров термокос. Разработка адаптированной к северо-восточному черноморскому шельфу методика автоматического детектирования и картирования морского мусора.
- Проведение численных экспериментов с модифицированной моделью BSAS12 по воспроизведению мезомасштабной структуры циркуляции в российском секторе моря и переноса загрязнений в различных условиях атмосферного форсинга и материкового стока.
- Описание характерных схем переноса морской взвеси и загрязнений в приустьевых акваториях малых рек российского черноморского побережья для различных типов ветрового воздействия с помощью модели STRiPE.
- Моделирование гидрохимического режима и кислородного режима моря с помощью модели биогеохимической модели BROM.
- Исследование характеристик ветрового волнения и его влияния на перенос загрязнений с помощью волновой модели MIKE21SW.
- Разработка методики проведения опросов «стейкхолдеров» (заинтересованных организаций и предприятий) региона и анализ проведенных опросов.

По официальным данным Минприроды РФ, в моря России ежегодно поступает аммонийного азота – 200 тыс.тонн, фосфора – 60 тыс.тонн, металлов – 50 тыс.тонн, различных нефтепродуктов – 30 тыс.тонн, фенолов – более 1 тыс.тонн. Район исследований - российский шельф Черного моря - является одним из наиболее

загрязненных в морях России: здесь отмечены значительные превышения ПДК по концентрациям мышьяка, железа, цинка, свинца, меди, стронция, нитратов и нитритов, а концентрация нефтепродуктов в некоторых случаях превышала условную норму в 12–19 раз. Показатели качества вод являются предметом мониторинга, выполняемого Росгидрометом, однако пространственное и временное разрешения этих наблюдений недостаточно высоки, кроме того, они, как правило, не сопровождаются достаточно полными гидрофизическими измерениями и гидробиологическими наблюдениями. Доступная натурная информация о загрязнениях прибрежных акваторий и об определяющих их процессах остается очень ограниченной.

Особое место отводится исследованиям проблемы загрязнения акваторий пластиковыми отходами (микропластик и макроскопический пластиковый мусор). Актуальность этой темы связана прежде всего с тем, что многократно усилившееся в последние годы антропогенное загрязнение пластиковым мусором существенно влияет на экосистемы на поверхности моря, морском дне, в толще воды и на береговой линии. Влияние пластика на морскую фауну и флору включает механические воздействия, вторжение в пищевые цепи, контаминацию стойкими загрязняющими веществами и интродукцию инвазивных видов (в частности, водорослей) в результате обрастания плавающих пластиковых фрагментов. На частицах пластика могут сорбироваться различные органические загрязнения, что также приводит к биоаккумуляции этих веществ при включении в пищевые цепи. В связи с этим, изучение процессов поступления, распространения и трансформации пластикового мусора в море может считаться актуальной задачей глобального масштаба.

Актуальность предлагаемой НИР определяется, прежде всего, многоцелевыми прикладными потребностями в количественных знаниях текущего состояния экологически значимых гидрологических процессов в прибрежных водах морей России, а также учета в этих целях передового мирового опыта. Активная и разнообразная морская хозяйственная деятельность (рекреационная, транспортная, социально-бытовая) на акватории и берегах этих морей в последние десятилетия быстро растет. Соответственно возрастает государственное и геополитическое значение исследований экологического состояния морей России, а также необходимость экологического контроля морской и береговой деятельности, что отражено в целом ряде нормативных актов Российской Федерации.

Научная значимость данных НИР определяется ключевым значением рассматриваемых прибрежных районов моря для функционирования морских экосистем в целом и их отдельных абиотических и биотических компонент. Другой немаловажный

фактор научной значимости - относительно слабая изученность многих физико-химических и биологических процессов на внутренних шельфовых акваториях, несмотря на повышенную плотность здесь натурных наблюдений в сравнении с многими другими районами океана. Этот кажущийся парадокс объясняется большой сложностью природных систем и обратных связей, действующих в прибрежной зоне моря, которая находится под одновременным влиянием океанологических и терригенных факторов, материкового стока и антропогенных воздействий.

Черное море пользовалось явно недостаточном научным вниманием со стороны российских организаций в сравнении с другими морями России. Так, по нашим оценкам, основанным на анализе открытых источников и отчетов, в 2020 году на проблемы Черного моря вместе с Азовским пришлось менее 3% от общего объема ресурсов, направляемых на морские исследования в нашей стране. Учитывая исключительную важность Черного моря для России в экономическом, социальном, геополитическом, историко-культурном отношениях, такое положение дел никак нельзя признать удовлетворительным. Прямым следствием этого является острая нехватка данных. Современное ухудшение экологической обстановки в российском секторе Черного моря связано не в последнюю очередь именно с отсутствием должного научно-методического сопровождения хозяйственной деятельности.

Полученные результаты работ полностью соответствуют требованиям Плана работ научного исследования.

1 Проведение комплексных мониторинговых исследований состояния морской среды в прибрежной зоне Чёрного моря от Керченского пролива до г. Сочи, а также гидрофизической и гидробиологической обстановки в прибрежной зоне в контексте антропогенной нагрузки и с учётом происходящих климатических изменений

1.1 Результаты комплексных мониторинговых исследований состояния морской среды в прибрежной зоне Чёрного моря от Керченского пролива до г. Сочи

1.1.1 Наблюдения в реперных точках в Геленджикской и Голубой бухтах в районе г. Геленджик

В 2022 году продолжены регулярные наблюдения за содержанием техногенных загрязнений (ТЗ) в реперных точках прибрежной зоны Черного моря в районе г. Геленджик.

Для проведения гидрохимического мониторинга были выбраны две реперные точки в Геленджикской и Голубой бухтах (рисунок 1.1.1.1). Выбор места точек наблюдений отражает особенности гидрохимического режима этих акваторий. Геленджикская бухта характеризуется затрудненным водообменом с морем и представляет собой наиболее уязвимый участок морского побережья, подверженный повышенной рекреационной нагрузкой. Голубая бухта практически соответствует открытому побережью, являясь акваторией, свободной для водообмена. Таким образом, исследуемые акватории представляют собой районы с различной степенью антропогенной нагрузки, в том числе и с точки зрения возможностей естественного самоочищения (Часовников В.К., 2007; 2016).

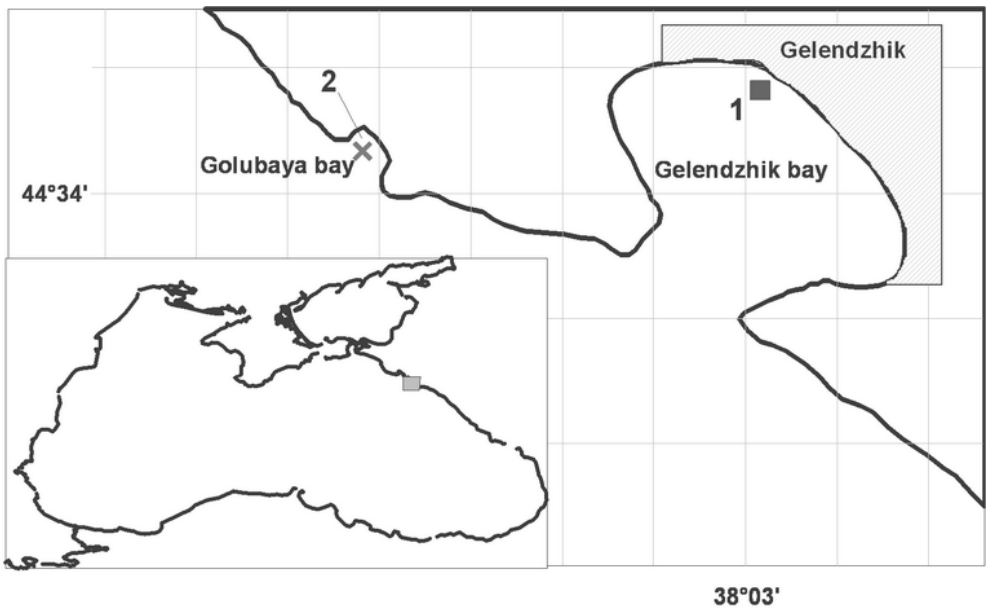


Рисунок 1.1.1.1 – Расположение точек отбора проб регулярного химического мониторинга в Геленджикской (1) и Голубой (2) бухтах

В течение 2022 г. был организован отбор проб с мола в Гелендикской бухте и с конца пирса ЮО ИО РАН в Голубой бухте, в этих точках пробы воды отбирались каждые две недели. Для оценки экологического состояния водной среды были выполнены определения содержания следующих техногенных загрязнений: нефтепродукты, детергенты (АПАВ), фенол, тяжелые металлы (Cu, Zn, Cd, Pb, Cr, Ni, Co), пестициды (ХОП: α-ГХЦГ, β-ГХЦГ, γ-ГХЦГ, гексахлорбензол (ГХБ), 4,4'-DDT, 4,4'-DDE, 4,4'-DDD) и бенз(а)пирен.

Отбор проб производился с поверхности воды. Анализ проводили в течение не более 2-х часов после отбора проб. Аналитические определения загрязняющих веществ (ЗВ) проводились в Лаборатории химии ЮО ИОРАН. Выполнено около 750 определений техногенных загрязнений.

Регулярные наблюдения в реперных точках позволяют получить данные о временной изменчивости ЗВ. На рисунке 1.1.1.2 представлены даты наблюдений и пример изменчивости содержания тяжелых металлов в 2022 году.

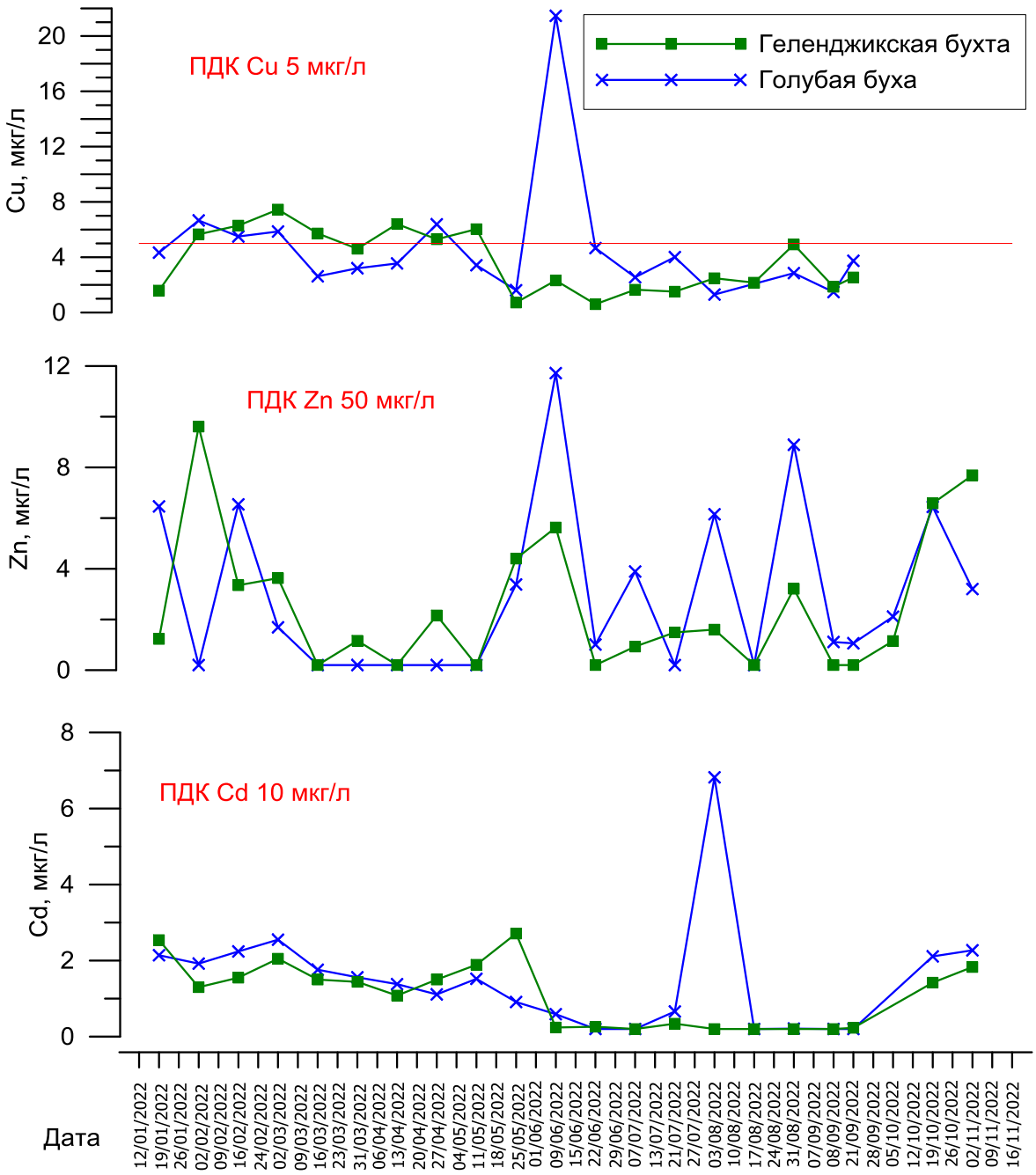


Рисунок 1.1.1.2 – Даты отбора проб и результаты мониторинговых наблюдений за содержанием металлов в реперных точках Геленджикской и Голубой бухт в 2022 году

Регулярные, подробные наблюдения за содержанием техногенных загрязнений имеют крайне важное значение, особенно в прибрежной зоне моря, поскольку именно эта акватория подвержена наиболее сильному антропогенному воздействию.

В табл. 1.1.1.1 представлены минимальные, максимальные, средние за год величины, зафиксированные в Геленджикской и Голубой бухтах и отношение их средних значений из которых видно во сколько раз отличается содержание техногенных загрязнений в различных бухтах. В целом, можно отметить повышенный фон содержания техногенных загрязнений в водах Геленджикской бухты для фенола, нефтепродуктов,

железа, марганца и 4,4'-DDE. В Голубой бухте, как и в прошлом году, зафиксирован более высокий фон содержания всех изомеров пестицидов, кроме 4,4'-DDE.

Таблица 1.1.1.2 – Диапазоны изменчивости и среднегодовые значения содержания загрязняющих веществ в воде Геленджикской и Голубой бухт, 2022 год

2022 год	Геленджикская бухта, С(гел)			Голубая бухта, С (гол)			Отношение средних значений
Параметр	Мин.	Макс.	Средн.	Мин.	Макс.	Средн.	$\frac{C(гел)}{C(гол)}$
Нефтепродукты, мг/л	0.013	0.039	0.019	0.004	0.029	0.015	1.28
Фенол, мкг/л	0.00	1.35	0.30	0.00	1.36	0.20	1.50
Детергенты (АПАВ), мг/л	0.021	0.077	0.043	0.024	0.062	0.048	0.90
Взвеш, в-во, мг/л	2.5	50	5.00	2	20	4.25	1.18
Железо (Fe), мг/л	0.003	0.118	0.010	0.002	0.036	0.008	1.25
Марганец (Mn), мг/л	0.015	0.266	0.032	0.011	0.107	0.024	1.33
Медь (Cu), мкг/л	0.60	7.45	2.54	1.30	21.46	3.65	0.70
Цинк (Zn), мкг/л	0.20	9.61	1.36	0.20	11.72	1.40	0.97
Кадмий (Cd), мкг/л	0.20	2.71	1.30	0.20	6.82	1.38	0.94
Свинец (Pb), мкг/л	1.37	3.67	2.56	0.25	4.54	2.61	0.98
Бенз(а)пирен, нг/дм³	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	1.00
ГХБ, нг/дм³	0.1	12.6	1.6	0.2	20.1	1.9	0.86
α-ГХЦГ, нг/дм³	0.2	13.5	2.9	0.1	16.6	3.0	0.96
γ-ГХЦГ , нг/дм³	0.1	3.0	0.1	0.0	3.0	0.2	0.50
β-ГХЦГ, нг/дм³	0.1	2.8	0.1	0.0	2.9	0.1	1.00
4,4'-DDE, нг/дм³	0.1	18.5	0.7	0.0	20.7	0.6	1.16
4,4'-DDD, нг/дм³	0.1	29.3	1.4	0.0	18.9	1.7	0.84
4,4'-DDT, нг/дм³	0.1	61.6	2.9	0.1	73.3	4.3	0.68
Σ DDE, DDD, DDT, нг/дм³	0.1	79.8	6.0	0.6	108.6	7.2	0.83
∑ ХОП, нг/дм³	2.2	93.9	12.8	2.2	147.6	13.2	0.96

Превышение ПДК выделены в таблице серым цветом.

Так, например, отношение средних концентраций (Сгел/Сгол) составляет для нефтепродуктов - 1.28 раза, фенола – 1.5 раза, железа – 1.25, марганец – 1.3 раза. Эти соотношения, говорят о том, во сколько раз больше воды Геленджикской бухты содержат техногенных загрязнений, по сравнению с Голубой бухтой.

Выше нормы ПДК, в 2022 году, зафиксированы отдельные максимальные значения техногенных загрязнений для – фенола, железа, марганца, меди и пестицидов (таблица 1.1.1.1). Остальные изученные загрязняющие вещества находились в воде в

концентрациях ниже ПДК. Главным фактором, определяющим состояние загрязненности прибрежных вод, является береговой сток (реки, ливневые воды), сточные канализационные сбросы.

Для получения информации о пространственном распределении техногенных загрязнений (ТЗ), в течение 2022 года, были выполнены 2 полигонные гидрохимические съемки Геленджикской и Голубой бухт в летний (30.06.22) и осенний (8.09.22) периоды. По результатам выполняемых полигонных съемок можно проследить характерное влияние малых рек, берегового стока, а также участки бухт наиболее подверженные антропогенному загрязнению.

Схемы расположения станций отбора проб воды и донных отложений представлены на рис. 1.1.1.3.

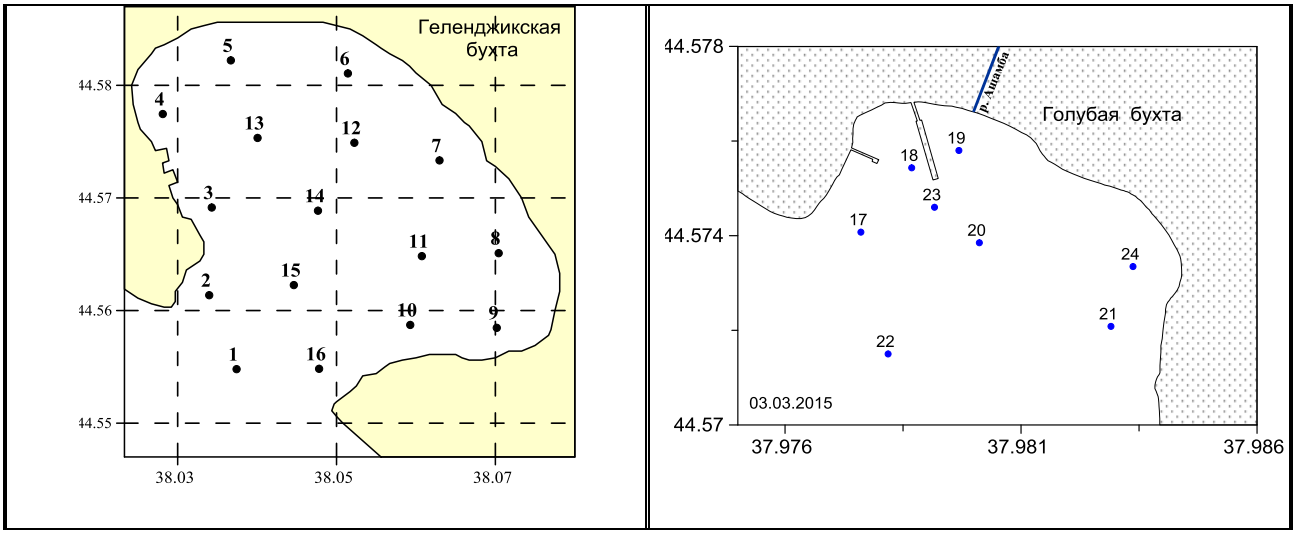


Рисунок 1.1.1.3 – Схема расположения станций в Геленджикской и Голубой бухтах

На рис. 1.1.1.4 и 1.1.1.5 представлен пример распределения нефтепродуктов и кадмия в водах акваторий Геленджикской и Голубой бухт, по данным полученным в 2022 году.

Из наиболее загрязненных участков акватории в Геленджикской бухте уже традиционно следует выделить, западный район, примыкающий к гидробазе, а также юго-восточный район, прилегающий к месту впадения реки Су-Аран, где происходит наиболее интенсивное антропогенное воздействие через пресноводный сток и как следствие накопление загрязнений. Для Голубой бухты накопление загрязняющих веществ приурочено к пирсу ЮО ИО РАН и впадению реки Ашамба.

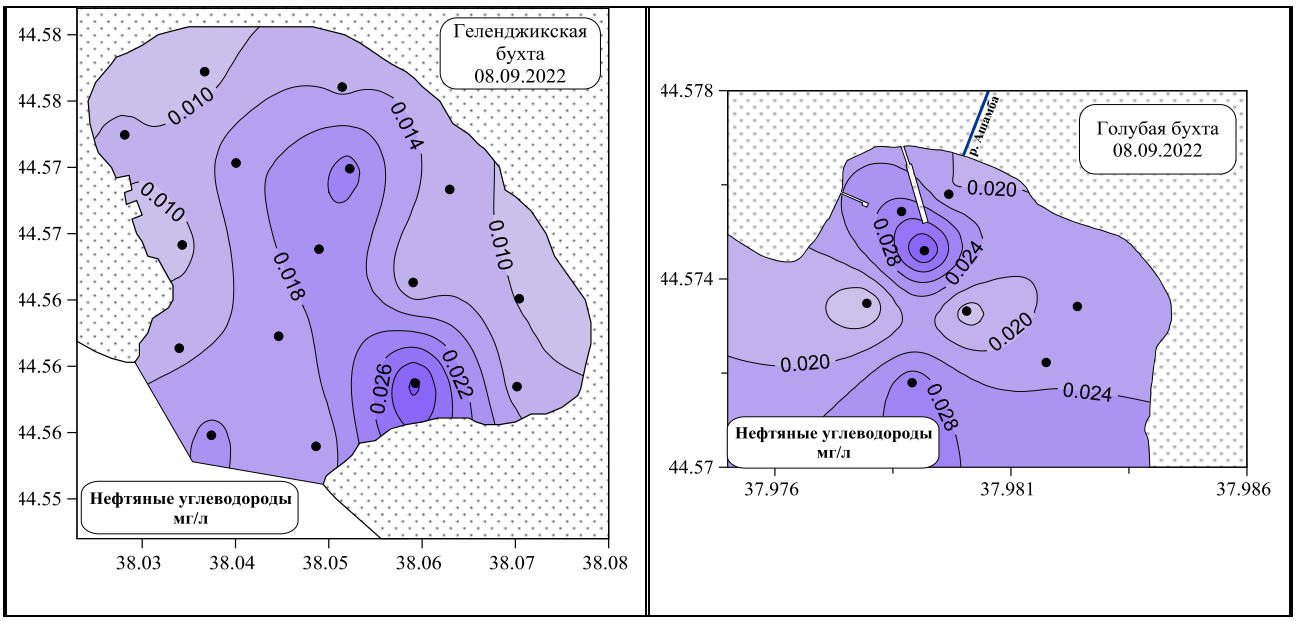


Рисунок 1.1.1.4 – Содержание в воде нефтепродуктов (мг/л)

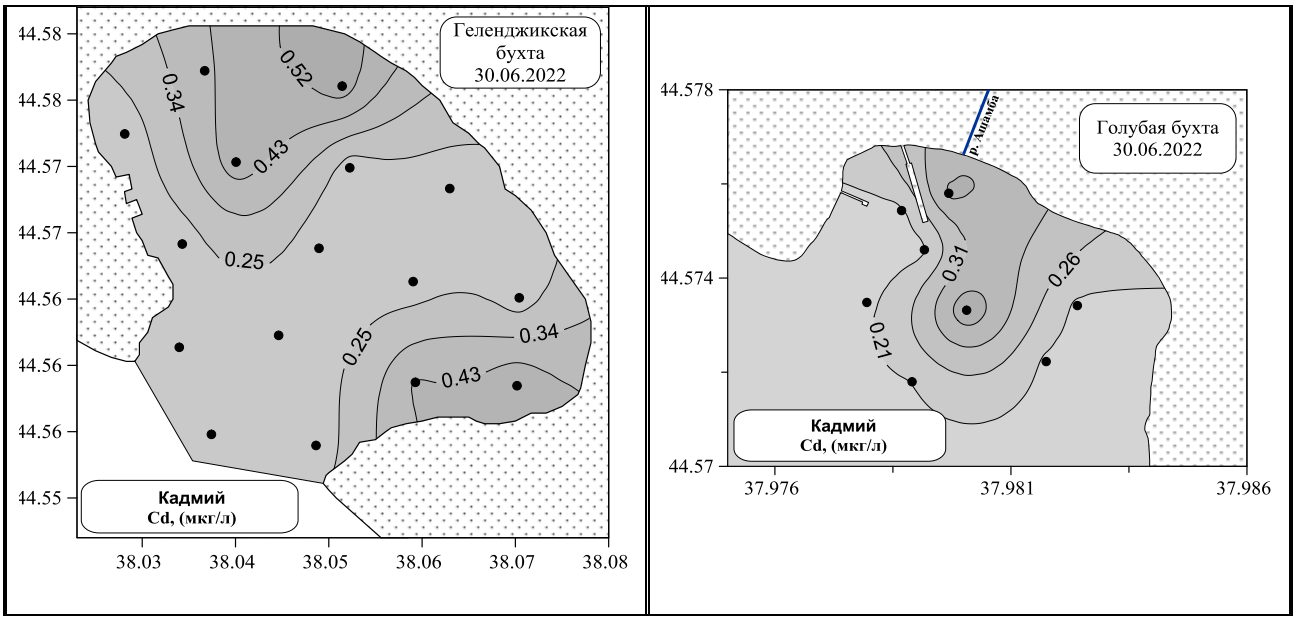


Рисунок 1.1.1.5 – Содержание в воде кадмия (мкг/л)

Исследования техногенных загрязнений в районе Геленджика показывают, что уровень содержания некоторых металлов, фенолов в 1.3 - 1.5 раза выше для акваторий с затрудненным водообменом и повышенной рекреационной нагрузкой, по сравнению с другими прибрежными водами. Процесс формирования очагов техногенных загрязнений в береговой зоне моря связан с расположением крупных водостоков и интенсивностью поступления через них загрязняющих веществ.

Донные отложения

Для оценки уровня загрязненности донных отложений в 2022 году были отобраны 24 пробы. Выполнены определения содержания следующих техногенных загрязнений: нефтепродукты, тяжелые металлы (Cu, Zn, Cd, Pb, Cr, Ni, Co), пестициды (ХОП: α-ГХЦГ, β-ГХЦГ, γ-ГХЦГ, гексахлорбензол (ГХБ), 4,4'-DDT, 4,4'-DDE, 4,4'-DDD) и бенз(а)пирен.

Полученные результаты представлены в таблице 1.1.1.2.

Таблица 1.1.1.2 – Минимальные, максимальные и средние значения содержания химических параметров в донных отложениях Геленджикской и Голубой бухты, 2022 год.

2022 год	Геленджикская бухта, С(гел)			Голубая бухта, С (гол)			Отношение средних значений
Параметр	Мин.	Макс.	Средн.	Мин.	Макс.	Средн.	$\frac{C(гел)}{C(гол)}$
Нефтепродукты, мг/г	0.005	0.158	0.037	0.005	0.115	0.032	1.1
Железо (Fe), мг/г	6.33	18.91	11.14	10.86	23.8	14.3	0.8
Марганец (Mn), мг/г	0.08	0.51	0.25	0.11	0.30	0.22	1.1
Медь (Cu) мкг/г	1.76	32.88	7.72	2.37	28.51	7.64	1.0
Цинк (Zn) мкг/г	4.46	57.86	20.27	6.96	46.75	16.66	1.2
Кадмий (Cd) мкг/г	0.020	0.178	0.030	0.020	0.200	0.046	0.7
Свинец (Pb) мкг/г	1.85	11.44	5.81	3.05	63.14	14.60	0.4
Кобальт (Co) мкг/г	0.94	7.67	3.51	1.21	6.21	2.65	1.3
Никель (Ni) мкг/г	3.26	31.60	10.90	3.25	28.67	8.78	1.2
Хром (Cr) мкг/г	0.15	5.25	0.89	0.15	1.21	0.15	5.9
Бенз(а)пирен, нг/г	0.5	8.3	2.5	0.5	2.1	0.7	3.4
α-ГХЦГ (α-HCH), нг/г	0.1	1.5	0.4	0.2	2.0	0.9	0.5
γ-ГХЦГ (γ-HCH), нг/г	0.1	1.9	0.8	0.1	3.3	0.8	1.0
β-ГХЦГ (β-HCH), нг/г	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	1.0
4,4'-DDE, нг/г	0.1	9.6	1.3	0.1	3.9	1.2	1.1
4,4'-DDD, нг/г	0.1	2.4	0.8	0.1	12.8	2.3	0.4
4,4'-DDT, нг/г	0.1	2.4	0.6	0.1	5.0	1.1	0.6
Гексахлорбензол (ГХБ), нг/г	0.1	4.6	0.8	0.1	5.9	1.2	0.6
Σ ДДТ, ДДД и ДДЭ, нг/г	0.0	14.0	2.7	0.1	17.8	4.5	0.6
ΣХОП (Σ Pesticides), нг/г	1.1	19.1	4.6	0.7	29.0	7.2	0.6

Зафиксированные превышения ДК выделены в таблице серым цветом.

Выше нормы допустимых концентраций (ДК) зафиксированы значения для нефтепродуктов, кадмия, γ-ГХЦГ и суммы пестицидов Σ ДДТ, ДДД, ДДЭ и ΣХОП.

Содержание остальных проанализированных техногенных загрязнений находилось в пределах существующих норм.

На рисунках 1.1.1.6-1.1.1.7 представлены карты распределения нефтепродуктов и бенз(а)пирена, отражающие характерные очаги накопления ЗВ в донных осадках Геленджикской бухты.

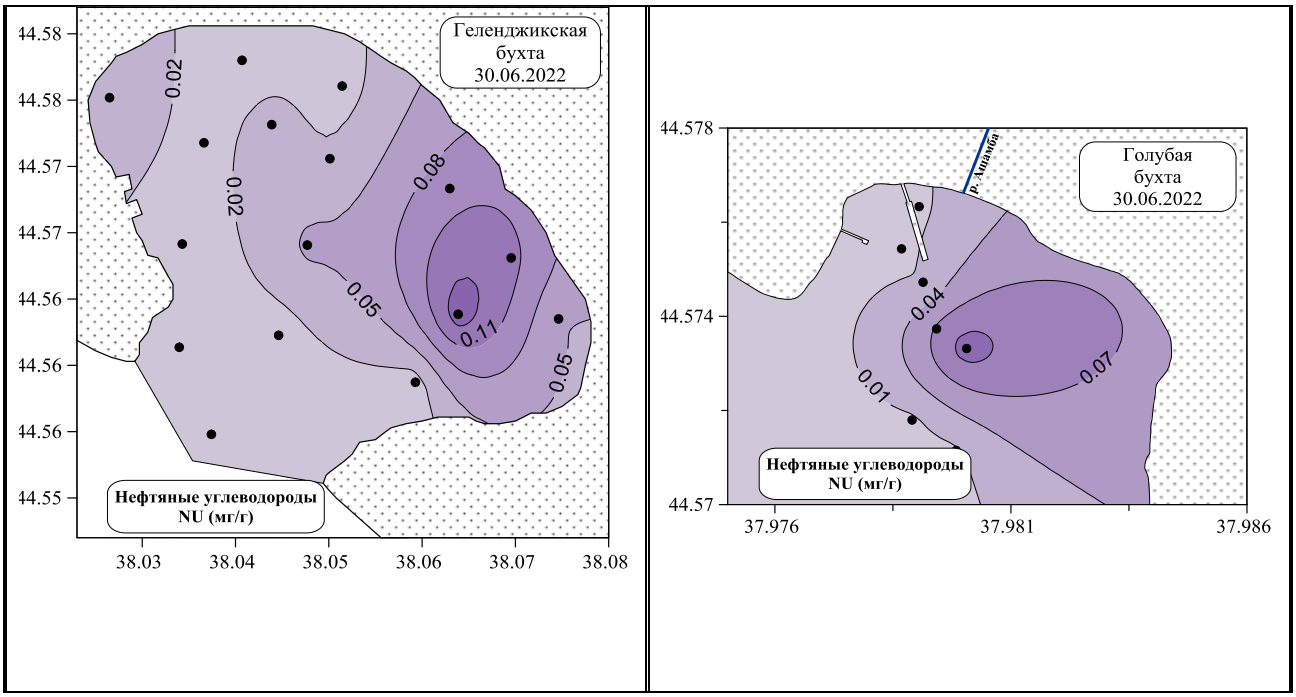


Рисунок 1.1.1.6 – Распределение нефтепродуктов в донных осадках Геленджикской и Голубой бухты - 30.06.2022 г.

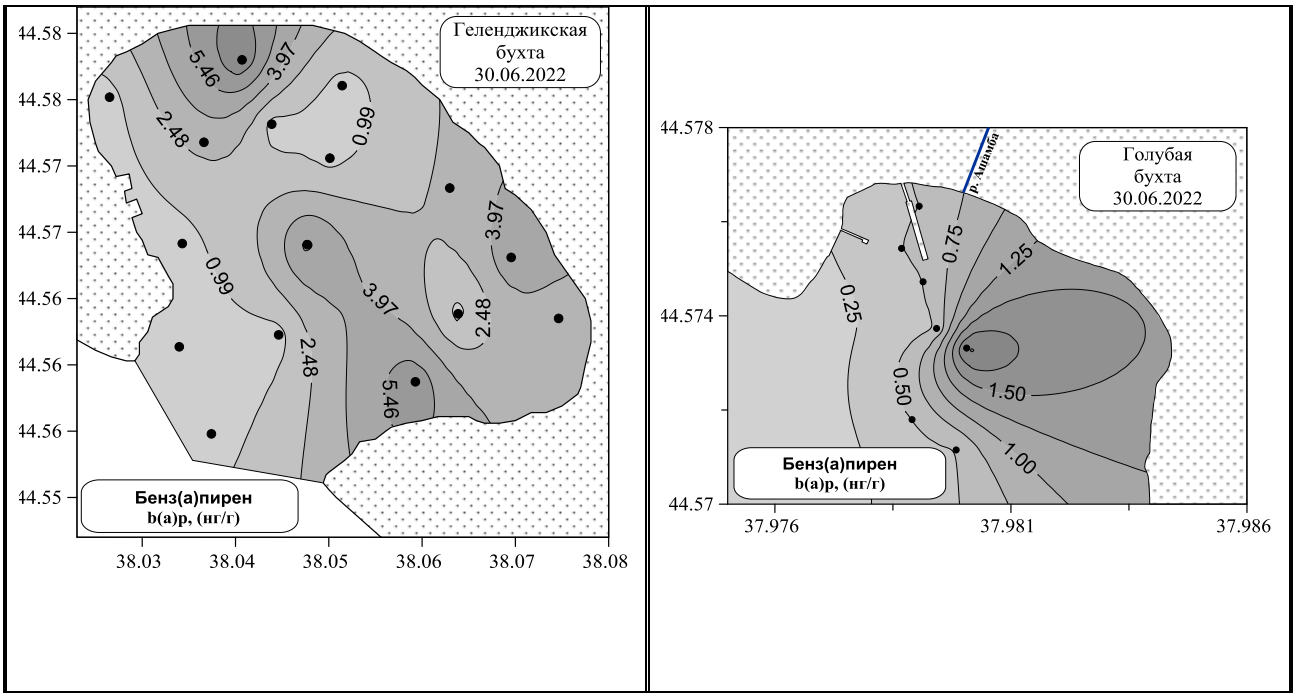


Рисунок 1.1.1.7 – Распределение бенз(а)пирена в осадках Геленджикской и Голубой бухты, съемка 30.06.2022 г.

Разница наблюдаемых концентраций ЗВ в донных отложениях между двумя бухтами (Сгел/Сгол) составляет, например: для цинка в 1.2 раз, кобальта в 1.3 раза, бенз(а)пирена в 3.4 раза, хрома в 5,9 раза.

Выполненные в текущем году работы, по исследованию уровня содержания загрязняющих веществ в донных осадках Геленджикского района позволили собрать обширный материал, требующий дальнейшей обработки. Построены картосхемы распределения загрязняющих веществ для Геленджикской и Голубой бухт. Полученные результаты показывают, что для донных отложений, а особенно для воды Геленджикской и Голубой бухт наблюдаются локальные превышения допустимых концентраций на отдельных станциях.

Полученные данные об уровне техногенных загрязнений говорят о реальном негативном воздействии хозяйственной деятельности человека на прибрежные акватории. Проведенный цикл химических исследований указывает на необходимость продолжения мониторинга этих участков побережья Черного моря.

Выводы к разделу 1.1.1

Выполнены исследования содержания техногенных загрязнений (нефтепродуктов, детергентов и тд.) в водах Геленджикской и Голубой бухт. Проведен сравнительный анализ двух бухт по уровню загрязненности их вод, для Геленджикской бухты характерен повышенный фон содержания таких параметров, как: нефтепродукты, фенолы, железо и марганец. Выявлены химические параметры, превышающие уровень ПДК, в 2022 году превышение нормы зафиксировано для фенола, железа, марганца, меди и пестицидов. Выполненные полигонные съемки отчетливо показывают наиболее загрязненные участки бухт, а также характерное влияние малых рек и берегового стока.

Произведен отбор проб и лабораторный анализ на содержание техногенных загрязнений (тяжелых металлов, нефтепродуктов, пестицидов и бенз(а)пирена) в донных отложениях Геленджикской и Голубой бухт. Проведен сравнительный анализ двух бухт по уровню загрязненности донных отложений на этих акваториях, для Геленджикской бухты характерен повышенный фон содержания таких ТЗ, как: бензапирен, цинк, хром, кобальт, никель. Выявлены загрязняющие вещества, превышающие допустимые концентрации в донных отложениях, в 2022 году они зафиксированы для нефтепродуктов, кадмия и пестицидов.

Полученные результаты работ полностью соответствуют требованиям Плана работ научного исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К РАЗДЕЛУ 1.1.1

1. В. К. Часовников, В. П. Чжу, О. А. Очередник, Е. С. Марьясова Оценка уровня техногенных загрязнений в прибрежной зоне Черного моря в районе Геленджика // Океанология, 2016, том 56, № 1, с. 76-80.
2. Техногенное загрязнение и процессы самоочищения Прикавказской зоны Черного моря/ Москва: Недра, 1996, с. 502.
3. Часовников В.К. Гидрохимический режим акваторий с затрудненным водообменном в условиях антропогенной нагрузки// Проблемы управления и устойчивого развития прибрежной зоны моря, г. Геленджик, 2007, 295-298.
4. Часовников В.К.,Чжу В.П.,Очередник О.А., Марьясова Е.С. Загрязнение донных осадков в прибрежной зоне северо-восточной части Черного моря// XXI Международная Научная Конференция (Школа) по морской геологии «Геология морей и океанов» (16–20 ноября 2015 г.), Москва, ИО РАН.
5. Neue Niederlandische Liste. Altlasten Spektrum 3/95, Warmer H., van Dokkum R., 2002, Water pollution control in the Netherlands. Policy and practice 2001, RIZA report 2002.009, Lelystad, 77 p.

1.1.2 Мониторинг загрязнений и качества морских вод в прибрежной зоне Черного моря

Мониторинг загрязнений и качества морских вод в прибрежной зоне Черного моря требуют тщательного изучения химического состава вод отдельных регионов побережья, наиболее сильно подвергающихся антропогенному воздействию человека. Главным фактором, определяющим состояние загрязненности прибрежных вод и донных отложений, является береговой сток (реки, ливневые воды), сточные канализационные сбросы, а для отдельных акваторий и поступление загрязняющих веществ через проливы.

В мае, сентябре и декабре 2022 года Лаборатория химии ЮО ИО РАН, обеспечила подготовку и выполнение аналитических работ по обработке гидрохимических проб из экспедиций в прибрежной акватории Черного моря в районе от Керченского пролива до г.Сочи.

Список оборудования:

- Атомно–абсорбционный спектрометр (ААС) «КВАНТ–2А»

- Газовый хроматограф «КристаЛюкс-4000М»
- Флюорат 02 3М
- Спектрофотометр: Hach (Германия)
- Электронные весы AV264C (США)
- Деионизатор: Simplicity 185
- Необходимое оборудование для функционирования химической лаборатории (дистилляторы, вытяжные шкафы, сушильные шкафы, химическая посуда и пр.)

Сбор, обработка и анализ материалов комплексного экологического мониторинга проводился стандартными общепринятыми океанографическими методами в соответствии с нормативными документами и инструкциями к оборудованию. Гидрохимические исследования проводились с помощью стандартных аналитических методов, принятых в практике морских химических исследований институтов РАН, на базе Лаборатории химии ЮО ИО РАН.

Были проведены необходимые подготовительные работы для аналитических определений, следующих химических параметров:

- в морской воде - тяжелые металлы (Cu, Zn, Cd, Pb, Cr, Ni, Co, Mn, Fe), детергенты (АПАВ), пестициды (ХОП: α-ГХЦГ, β-ГХЦГ, γ-ГХЦГ, гексахлорбензол (ГХБ), 4,4'-DDT, 4,4'-DDE, 4,4'-DDD).
- в донных отложениях - тяжелые металлы (Cu, Zn, Cd, Pb, Cr, Ni, Co, Mn, Fe), пестициды (ХОП: α-ГХЦГ, β-ГХЦГ, γ-ГХЦГ, гексахлорбензол (ГХБ), 4,4'-DDT, 4,4'-DDE, 4,4'-DDD).

В течении 2022 года в рамках проекта было выполнено три морских экспедиции, океанологические работы выполнены в весенний (май), осенний (сентябрь) и зимний (декабрь) сезоны.

Схема расположения основных (за исключением г. Севастополь) точек отбора проб воды представлена на рисунке 1.1.2.1.

С борта НИС «Ашамба» проведены исследования состояния морских вод в прибрежной зоне Черного моря от Керченского пролива до г. Сочи (п. Лазаревский). За время всех экспедиционных работ были выполнены 95 станций с отбором проб воды с поверхностного горизонта. Отобранные пробы, в переносных холодильниках, оперативно отправлялись автотранспортом в береговую лабораторию Химии ЮО ИО РАН для последующего аналитического определения расширенного комплекса техногенных загрязнений (ТЗ).

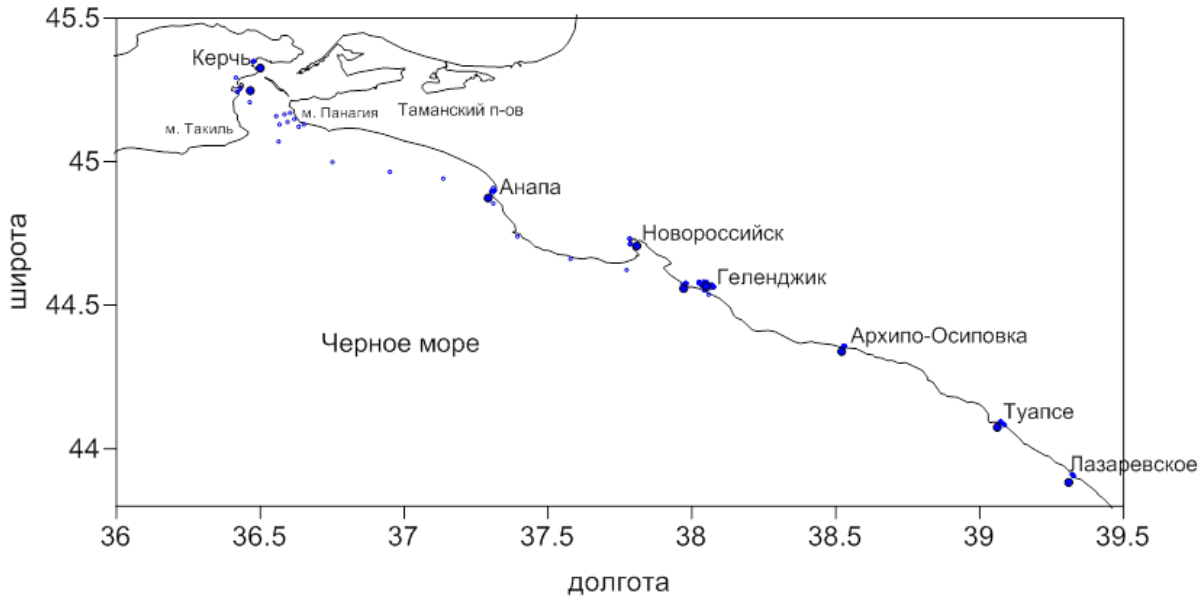


Рисунок 1.1.2.1 – Схема районов/станций отбора проб воды в 2022 году (весна, осень, зима)

Для оценки экологического состояния водной среды были выполнены определения содержания следующих ТЗ: детергенты (АПАВ), тяжелые металлы (Cu, Zn, Cd, Pb, Cr, Ni, Co, Mn, Fe) и пестициды (ХОП: α-ГХЦГ, β-ГХЦГ, γ-ГХЦГ, гексахлорбензол (ГХБ), 4,4'-DDT, 4,4'-DDE, 4,4'-DDD). В результате проведенных аналитических работ в 95 пробах по 17 показателям получены 1615 значений содержания в воде этих техногенных загрязнений.

Для оценки экологического состояния донных отложений в прибрежной акватории Черного моря в 2022 году были выполнены исследования уровней содержания загрязнений осадков от Керченского пролива до г. Сочи (п. Лазаревский), схема отбора проб на рисунке 1.1.2.2.

Пробы грунта, как и воды, отбирались в течении мая, сентября и декабря в поверхностном слое осадков (0-5 см). Выполнены определения следующих техногенных загрязнений: тяжелые металлы (Cu, Zn, Cd, Pb, Mn, Fe, Co, Cr, Ni), хлорорганические пестициды ХОП: α-ГХЦГ, β-ГХЦГ, γ-ГХЦГ, гексахлорбензол (ГХБ), 4,4'-DDT, 4,4'-DDE, 4,4'-DDD).

За время экспедиционных работ были отобраны 37 проб донных отложений, которые оперативно доставлялись в береговую лабораторию Химии ЮО ИО РАН для последующего аналитического определения комплекса техногенных загрязнений (ТЗ).

В результате проведенных аналитических работ в 37 пробах по 16 показателям получены 592 значения содержания техногенных загрязнений.

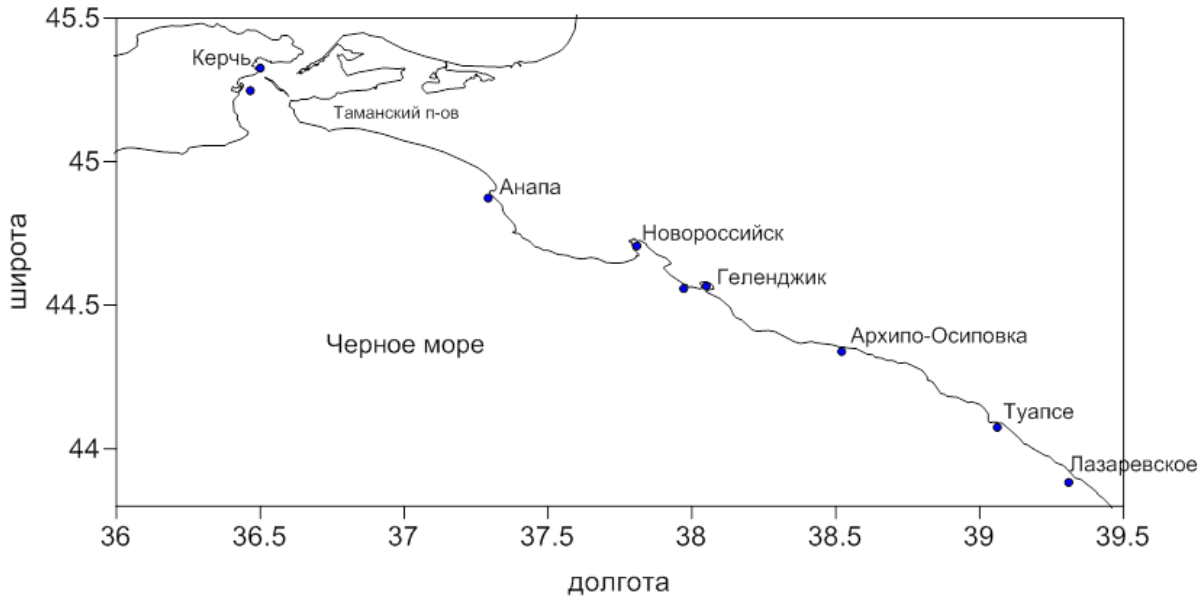


Рисунок 1.1.2.2 – Схема отбора проб донных отложений в 2022 году (весна, осень, зима)

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

Отбор проб из батометров, осуществлялся непосредственно после их подъема на палубу в соответствие с принятыми методиками. Пробы морской воды на содержание тяжелых металлов отбирались в пластиковые емкости. Перед отбором емкость трижды ополаскивалась пробой, затем заливалась проба. Консервация проб осуществлялась сразу после отбора. Консервация производится HCl 1М (4.4. мл кислоты на 200 мл пробы), чтобы после добавления кислоты pH пробы составлял 2. На остальные техногенные загрязнения отбор проб осуществлялся в стеклянную тару в соответствие с методикой определения соответствующих химических параметров.

Детергенты - Измерение массовой концентрации анионных поверхностно-активных веществ (АПАВ) осуществляем по методике ПНДФ 14.1:2:4.158- 2000. Метод основан на экстракции хлороформом ионных пар АПАВ с красителем акридиновый желтый и измерении массовой концентрации АПАВ в полученном экстракте флуориметрическим методом с использованием анализатора жидкости «Флюорат-02 3М». Диапазон измерений 0,025-2 мг/дм3.

Тяжелые металлы - Измерение массовых концентраций кобальта, никеля, меди, цинка, хрома, кадмия и свинца осуществляется по методике ПНД Ф 14.1:2:4.139-98 методом атомно-абсорбционной спектрометрии на ААС спектрометре КВАНТ-2А. Метод основан на измерении резонансного поглощения света свободными атомами определяемого металла при прохождении света через атомный пар исследуемого образца, образующийся в пламени.

Пестициды (ХОП) - Измерение массовой концентрации хлорорганических пестицидов (ХОП) в пробах питьевых, природных и сточных вод методом газовой хроматографии (Газовый хроматограф "КристаЛюкс-4000М") осуществляется по методике ПНД Ф 14.1:2:4.204-04. с использованием электронно-захватного детектора после количественного извлечения анализируемых соединений гексаном и концентрирования экстракта. Диапазон измерения 0,1 –500 нг/дм3.

Для аналитических определений использовалось оборудование Лаборатории химии ЮО ИОРАН.

Методика обработки аналитических данных

При обработке аналитических данных использовались:

- пакет программ *Microsoft Office – Word, Excel* – для создания базовых таблиц, выполнения статистического анализа и составления отчёта;
- пакет Grapher 10, Surfer 11, для картографического построения и статистических расчетов;

Оценка степени загрязнения воды и донных осадков химическими веществами проводилось по каждому веществу с учетом следующих закономерностей:

- опасность загрязнения тем выше, чем больше фактическое содержание компонентов загрязнения почвы превышает ПДК;
- опасность загрязнения тем выше, чем выше класс опасности контролируемого вещества, его растворимость в воде, его подвижность в осадке;
- характеристикой степени загрязнения является также частота встречаемости ЗВ (в процентах).

Для оценки уровня загрязнения морской среды использовали метод нормирования загрязняющего вещества по ПДК. Опасность загрязнения тем выше, чем больше фактическое содержание компонента превышает ПДК, что выражается коэффициентом $К_о$ =С/ПДК. Опасность загрязнения тем выше, чем больше коэффициент $К_о$ превышает единицу и чем выше класс опасности ЗВ.

Результаты полевых исследований в 2022 г.

В период с мая по декабрь 2022 года осуществлены три экспедиционных выхода в море на НИС «Ашамба» в прибрежной зоне Черного моря. Район исследований включал акватории от Керченского пролива до Большого Сочи (п. Лазаревский) (см. схему на рисунке 1.1.2.1.

Морская вода. Всего было выполнено 95 станций, с отбором проб воды и 37 станций с отбором проб донных отложений. В таблице 1.1.2.1 представлены некоторые статистические данные полученные после обработки результатов всех полевых работ, выполненных в 2022 г. Зафиксированные превышения ПДК выделены в таблице серым цветом. В течении года, превышение ПДК в воде, наблюдалось по среднему содержанию пестицидов. Выше нормы, за период наблюдений, зафиксированы отдельные значения для – железа, марганца, меди, цинка, никеля и кобальта.

Таблица 1.1.2.1 – Минимальные, максимальные и средние значения содержания загрязняющих веществ в воде, Севастополь-Керчь-Лазаревское, 2022 г.

Параметр/Год	Минимум	Максимум	Среднее	ПДК*
Железо (Fe), мг\л	0.004	0.060	0.011	0.05 мг/л
Марганец (Mn), мг\л	0.011	0.119	0.025	0.05 мг/л
АПАВ*, мг/л	0.015	0.072	0.038	0.1 мг/л
Медь(Cu), мкг\л	1.34	20.82	4.02	5 мкг/л
Цинк (Zn), мкг\л	0.20	67.94	2.39	50 мкг/л
Кадмий (Cd), мкг\л	0.20	3.96	0.98	10 мкг/л
Свинец (Pb), мкг\л	0.25	8.84	2.00	10 мкг/л
Никель (Ni), мкг\л	3.00	27.48	3.00	10 мкг/л
Кобальт (Co), мкг\л	3.00	26.35	6.73	5 мкг/л
Хром (Cr), мкг\л	1.5	13.2	1.50	20 мкг/л
ГХБ, нг/дм³	0.1	7.5	0.9	Отсутствие
α-ГХЦГ (α-HCH), нг/дм³	0.1	13.8	1.0	Отсутствие
γ-ГХЦГ (γ-HCH), нг/дм³	0.1	3.1	0.4	Отсутствие
β-ГХЦГ (β-HCH), нг/дм³	0.1	7.0	0.6	Отсутствие
4,4'-DDE, нг/дм³	0.1	32.2	0.4	Отсутствие
4,4'-DDD, нг/дм³	0.1	8.4	0.1	Отсутствие
4,4'-DDT, нг/дм³	0.1	16.1	0.1	Отсутствие
Σ (DDE, DDD, DDT), нг/дм³	0.1	32.2	1.8	Отсутствие
ΣХОП (Σ Pesticides), нг/дм³	0.9	45.2	5.4	10 нг/дм³

АПАВ* - Анионные поверхностно-активные вещества

ПДК* - по «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых

концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения» ПРИКАЗ от 13 декабря 2016 года N 552 МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ (с изменениями на 12 октября 2018 года)

В таблице 1.1.2.2 представлены диапазоны изменчивости и средневзвешенные величины содержания ТЗ, полученные в результате всех полевых работ, выполненных в 2022 году. Зафиксированные превышения ДК выделены в таблице серым цветом.

Таблица 1.1.2.2 – Минимальные, максимальные и средние значения содержания загрязняющих веществ в донных отложениях, Керчь-Лазаревское, 2022 г.

Параметр/Год	Минимум	Максимум	Среднее	ДК*
Железо (Fe), мг\г	5.32	22.11	9.64	-
Марганец (Mn), мг\г	0.10	0.89	0.29	-
Медь(Cu), мкг\г	1.90	32.88	8.15	35
Цинк (Zn), мкг\г	4.65	67.53	23.31	140
Кобальт (Co), мкг\г	0.32	8.09	3.32	20
Кадмий (Cd), мкг\г	0.020	0.178	0.021	0.8
Никель (Ni), мкг\г	3.26	162.6	10.50	35
Хром (Cr), мкг\г	0.15	7.08	0.15	100
Свинец (Pb), мкг\г	0.43	13.99	4.44	85
ГХБ, нг/г	0.1	32.2	0.1	-
α-ГХЦГ (α-HCH), нг/г	0.1	0.7	0.1	-
γ-ГХЦГ (γ-HCH), нг/г	0.1	1.9	0.1	0.05
β-ГХЦГ (β-HCH), нг/г	0.1	0.2	0.1	-
4,4'-DDE, нг/г	0.1	9.6	0.2	-
4,4'-DDD, нг/г	0.1	14.9	0.1	-
4,4'-DDT, нг/г	0.1	44.1	0.1	-
Σ (DDE, DDD, DDT), нг/г	0.0	67.5	0.8	2.5
ΣХОП (Σ Pesticides), нг/г	0.1	68.1	1.1	-

ДК* - допустимые уровни концентраций (ДК) загрязняющих веществ в донных отложениях водоемов в соответствии с зарубежными нормами (Neue Niederlandische Liste. Altlasten Spektrum 3/95)

Выше нормы ДК, за период наблюдений, зафиксированы отдельные значения для – никеля, γ-ГХЦГ и Σ (DDE, DDD, DDT). Остальные изученные параметры не превышали допустимые уровни концентраций (ДК).

Первая экспедиция - весна 2022 года.

Морская вода

Весной 2022 года был выполнен первый полевой этап, отобраны пробы воды на определение наиболее опасных загрязняющих веществ (ЗВ), таких как - тяжелые металлы (ТМ), пестициды (ХОП) и детергенты (поверхностно-активные вещества). В мае 2022

года в 26 пробах были определены эти компоненты.

В таблице 1.1.1.5 приводятся минимальные, максимальные и средние величины, зафиксированные во время выполненных работ в весенний сезон. Зафиксированные превышения ДК выделены в таблице серым цветом.

Таблица 1.1.1.5 – Минимальные, максимальные и средние значения содержания загрязняющих веществ в воде, Голубая бухта-Геленджик-Лазаревское, май 2022 г.

Параметр/весна	Минимум	Максимум	Среднее	ПДК*
Железо (Fe), мг\л	0.008	0.029	0.013	0.05 мг/л
Марганец (Mn), мг\л	0.018	0.058	0.024	0.05 мг/л
АПАВ*, мг/л	0.021	0.064	0.053	0.1 мг/л
Медь(Cu), мкг\л	1.47	6.24	3.53	5 мкг/л
Цинк (Zn), мкг\л	1.90	48.39	5.32	50 мкг/л
Кадмий (Cd), мкг\л	0.20	2.33	1.07	10 мкг/л
Свинец (Pb), мкг\л	0.45	8.61	2.03	10 мкг/л
Никель (Ni), мкг\л	3.0	5.8	3.0	10 мкг/л
Кобальт (Co), мкг\л	3.0	26.4	11.5	5 мкг/л
Хром (Cr), мкг\л	2.0	2.0	2.0	20 мкг/л
ГХБ, нг/дм³	0.8	1.8	1.3	Отсутствие
α-ГХЦГ (α-HCH), нг/дм³	0.2	2.2	0.8	Отсутствие
γ-ГХЦГ (γ-HCH), нг/дм³	0.1	1.7	0.1	Отсутствие
β-ГХЦГ (β-HCH), нг/дм³	0.1	2.6	1.0	Отсутствие
4,4'-DDE, нг/дм³	0.4	1.0	0.6	Отсутствие
4,4'-DDD, нг/дм³	0.4	8.4	1.3	Отсутствие
4,4'-DDT, нг/дм³	0.1	10.2	0.1	Отсутствие
Σ (DDE, DDD, DDT),	1.0	19.6	2.4	Отсутствие
ΣХОП (Σ Pesticides),	1.9	20.7	5.6	10 нг/дм³

АПАВ* - Анионные поверхностно-активные вещества

ПДК* - по «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения» ПРИКАЗ от 13 декабря 2016 года N 552 МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ (с изменениями на 12 октября 2018 года)

В мае, превышение ПДК в воде, наблюдалось по среднему содержанию кобальта и индивидуальных изомеров пестицидов. Выше нормы, за период наблюдений, зафиксированы максимальные значения для – марганца и меди.

Для пестицидов (ХОП) в различных нормативных документах существуют сильно отличающиеся друг от друга значения ПДК. Существует минимальное значение

содержания суммы ХОП для рыбохозяйственных водоемов (ПДК -10 нг/л), для отдельных изомеров предполагается их отсутствие в морской среде.

Детергенты (АПАВ). Уровень содержания анионных поверхностно-активных веществ не превышал ПДК (ПДКр.х. АПАВ – 0.1 мг/л) во время съемки в мае 2022 г. Средняя концентрация анионных СПАВ за период наблюдений, составила 0.053 мг/л (0,53 ПДК), максимальное значение 0,64 мг/л, минимальное – 0,021 мг/л. Характерно достаточно равномерное распределение в прибрежной зоне (рисунок 1.1.2.3), более повышенные величины АПАВ были приурочены к району Геленджика, в Туапсе и Лазаревском зафиксированы минимальные значения.

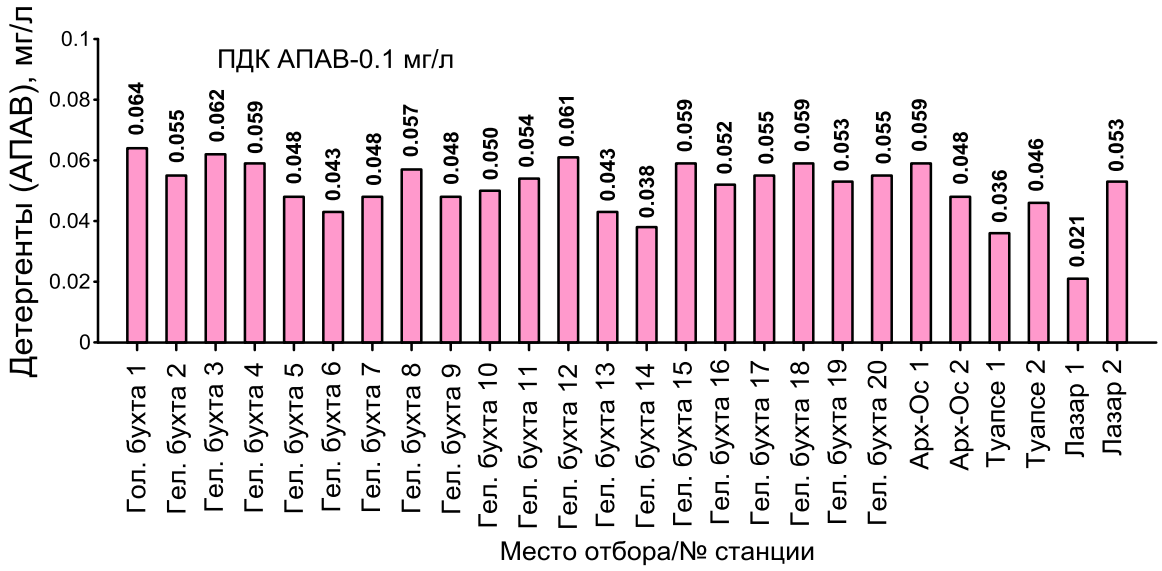


Рисунок 1.1.2.3 – Содержание АПАВ (мг/л), май 2022 г.

Свинец (Pb)

Концентрация свинца на поверхности вод изменялась в диапазоне от 0.45 до 8.61 мкг/л, средняя концентрация составила 2,03 мкг/л. Опасность загрязнения тем выше, чем больше фактическое содержание компонента превышает ПДК, что выражается коэффициентом Ко =С/ПДК. Опасность загрязнения тем выше, чем больше коэффициент Ко превышает единицу. Для среднего содержания свинца это отношение составило 0.2 ПДК, а для максимального – 0,86 ПДК. Содержание свинца не превышало существующую норму (ПДК Pb - 10 мкг/л). Максимальная величина 8,61 мкг/л зафиксирована на станции 7, в Геленджикской бухте (рисунок 1.1.2.4). Для остальных станций характерен более пониженный фон содержания этого металла и, в целом, равномерное распределение в прибрежной зоне.

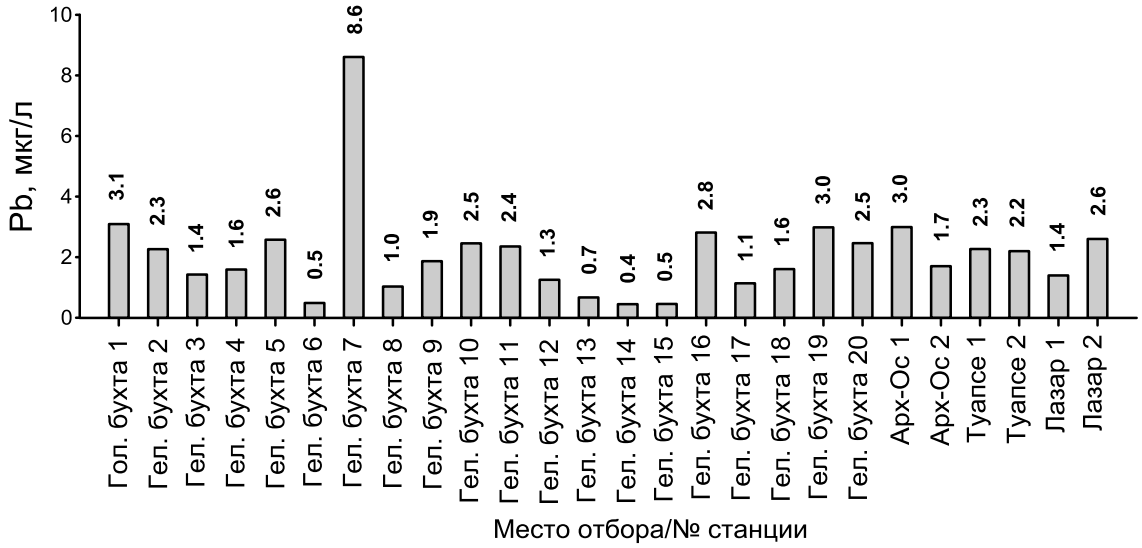


Рисунок 1.1.2.4 – Содержание свинца (мкг/л) на поверхности, май 2022 г.

Кадмий (Cd). Концентрация кадмия во всей толще исследуемых вод изменялась от 0,20 до 2,33 мкг/л. Превышение ПДК (ПДК Cd 0.01 мг/л или 10 мкг/л) не зафиксировано. Средняя концентрация составила 1.07 мкг/л, соответственно 0,11 ПДК. В целом, содержание кадмия в исследуемом районе не превышает фоновые значения. Относительно повышенные величины приурочены к г. Геленджик, однако загрязнения акватории этим элементом не наблюдается (рисунок 1.1.2.5).

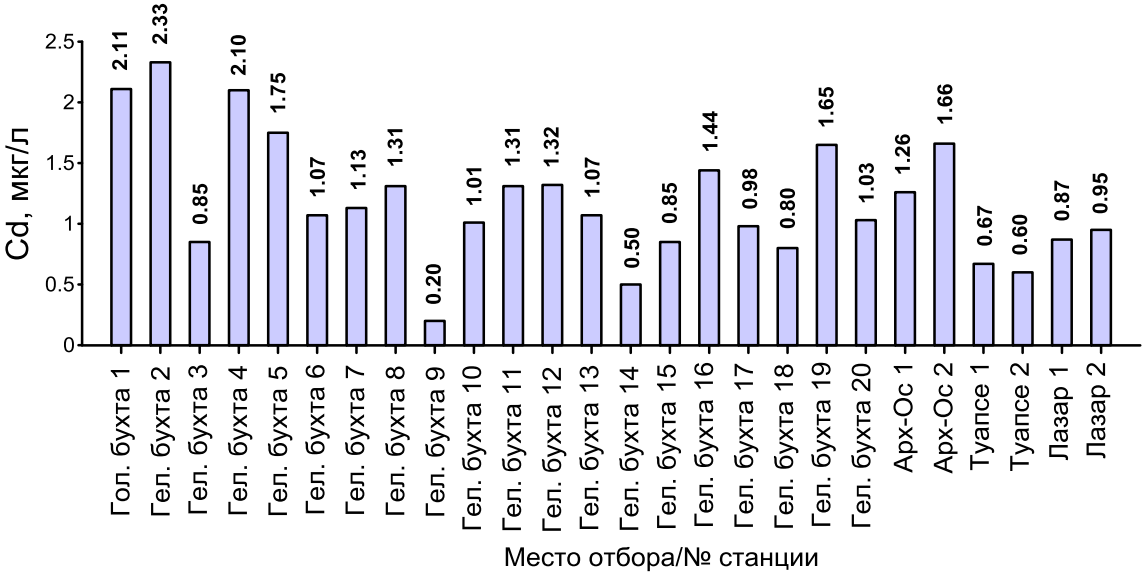


Рисунок 1.1.2.5 – Содержание кадмия (мкг/л) на поверхности, май 2022 г.

Медь (Cu). Концентрация меди во всей толще исследуемых вод изменялась в диапазоне от 1.75 до 6,24 мкг/л, средняя концентрация составила 3,53 мкг/л. Содержание меди, превышающее существующие нормы (ПДКр.х. Cu - 5 мкг/л), зафиксировано в 4

пробах (рисунок 1.1.2.6). Отношение С/ПДК среднего значения составляет 0,71 и 1,25 ПДК для максимального значения. Наиболее высокие величины Cu наблюдались в районе п. Архипо-Осиповка и в Геленджикской бухте. Следует отметить, что для прибрежной акватории Черного моря характерен фон содержания меди близкий к существующей норме ПДК.

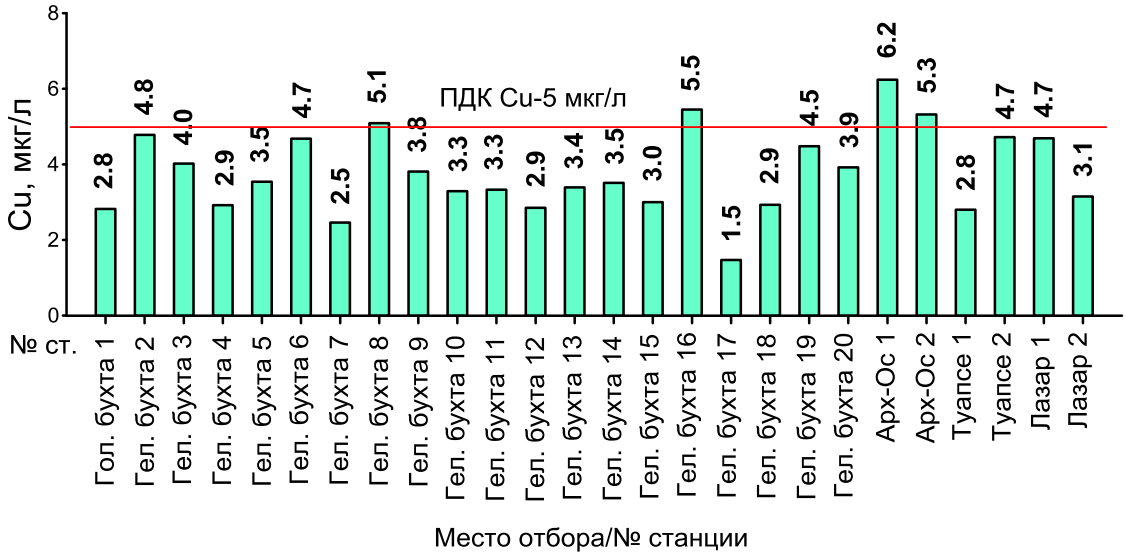


Рисунок 1.1.2.6 – Содержание меди (мкг/л) на поверхности, май 2022 г.

Цинк (Zn). Концентрация цинка на поверхности исследуемых вод находилась ниже ПДК (Zn- 50 мкг/л). В период весенней экспедиции, диапазон изменчивости этого металла составил от 1.9 до 48.4 мкг/л, средняя концентрация 5.32 мкг/л. В целом, содержание цинка по акватории довольно равномерное, за исключением отдельного максимума в Голубой бухте, где зафиксировано одно аномально высокое значение (рисунок 1.1.2.7). Содержание цинка в исследуемом районе составило для максимального значения 0.97 ПДК, для средних величин – 0.11 ПДК. Таким образом, загрязнения акватории этим металлом не наблюдается.

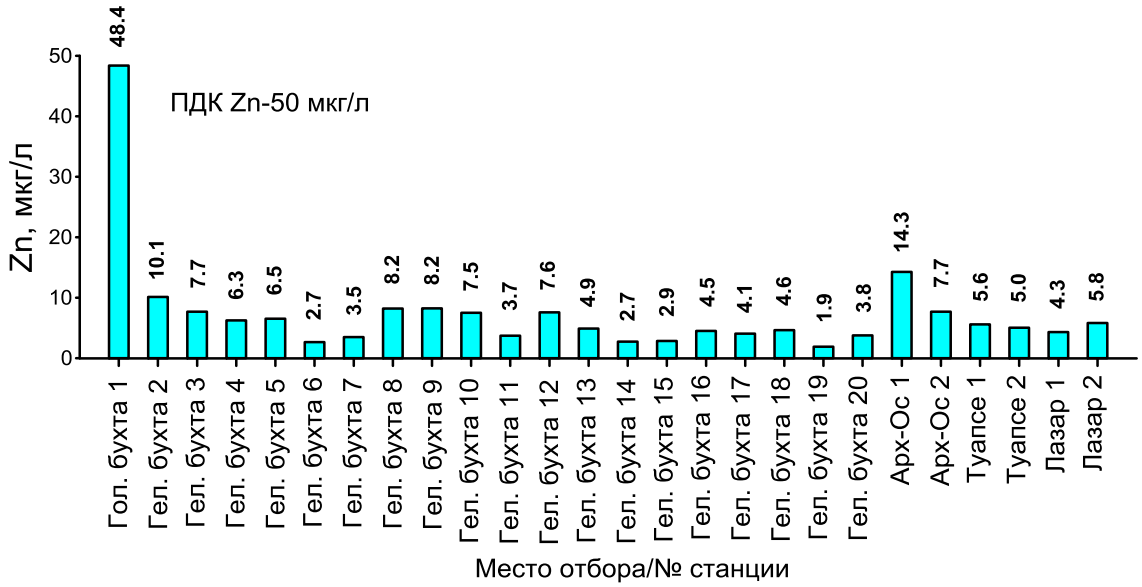


Рисунок 1.1.2.7 – Содержание цинка (мкг/л) на поверхности, май 2022 г.

Никель (Ni). Согласно нормативам для водных объектов рыбохозяйственного назначения, ПДК для содержания никеля в морской среде составляет 10 мкг/л. Анализ на содержание Ni выполнен на 26 горизонтах, величины выше предела обнаружения 3 мкг/л, зафиксированы только в одной пробе. Концентрация никеля во всей толще вод изменялась в диапазоне от < 3 до 5,8 мкг/л, средняя концентрация составила < 3 мкг/л. Таким образом, загрязнения акватории этим металлом не наблюдается.

Хром (Cr). Концентраций хрома во всех пробах выше аналитического нуля - 2 мкг/л не обнаружено.

Кобальт (Co). Согласно нормативам для водных объектов рыбохозяйственного назначения, ПДК для содержания кобальта в морской среде составляет 5 мкг/л. В 21 из 26 проб (81%), содержание Co превышало существующие нормы (рисунок 1.1.2.8). Концентрация кобальта в воде изменялась в диапазоне от < 3 до 26,4 мкг/л, средняя концентрация составила 11,5 мкг/л. Отношение С/ПДК среднего значения для Co составляет 2,3 и 5,3 ПДК для максимального значения. Что означает, что как для максимального, так и для средних величин содержания Co наблюдается превышение нормы, соответственно в 5.3 и 2.3 раза. Для распределения кобальта, в мае месяце, характерны повышенные величины в районе Геленджика, превышение ПДК также зафиксировано в одной пробе в Туапсе. Таким образом, зафиксировано, что акватория района в период наблюдений загрязнена кобальтом, с величинами, превышающими норму ПДК.

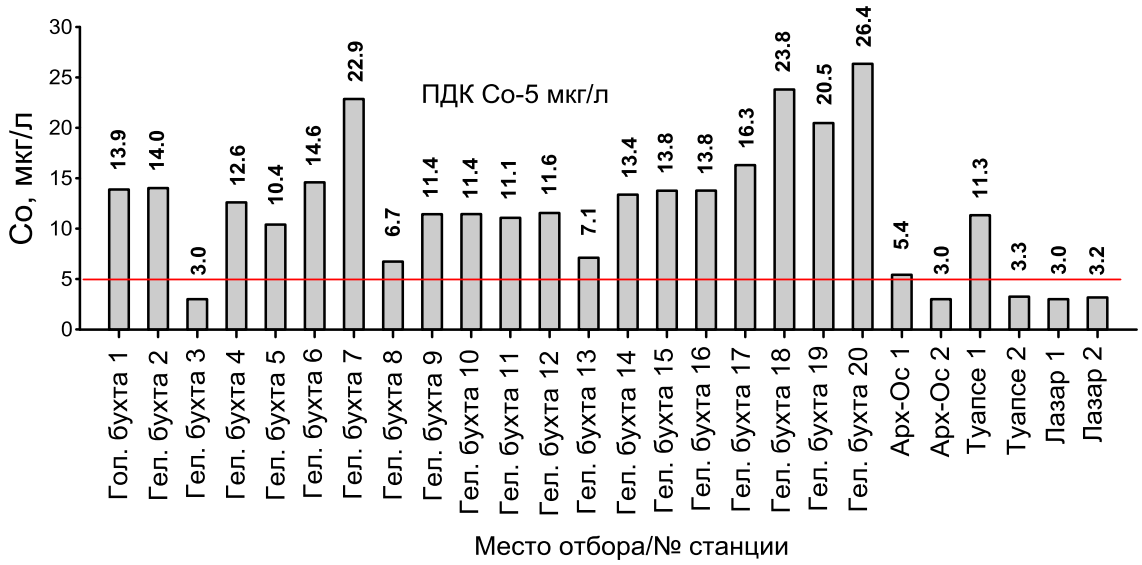


Рисунок 1.1.2.8 – Содержание кобальта (мкг/л) на поверхности, май 2022 г.

Марганец (Mn). Концентрация марганца изменялась на поверхности вод от 0,018 мг/л до 0,058 мг/л. Средняя концентрация составила 0,024 мг/л. Выше нормы ПДК (ПДК 0,05 мг/л) зафиксировано одно значение, в районе Туапсе. В целом, по прибрежной акватории отношение С/ПДК среднего значения составляет 0,48 и 1.2 ПДК для максимального значения. Максимальная величина зафиксирована на станции Туапсе 2, где, из рядом расположенных станций, на трех наблюдаются повышенные величины (рисунок 1.1.2.9). На рисунке видно, что повышенный фон содержания марганца характерен для южной части исследованной акватории, максимальные величины приурочены к району Туапсе - Лазаревское.

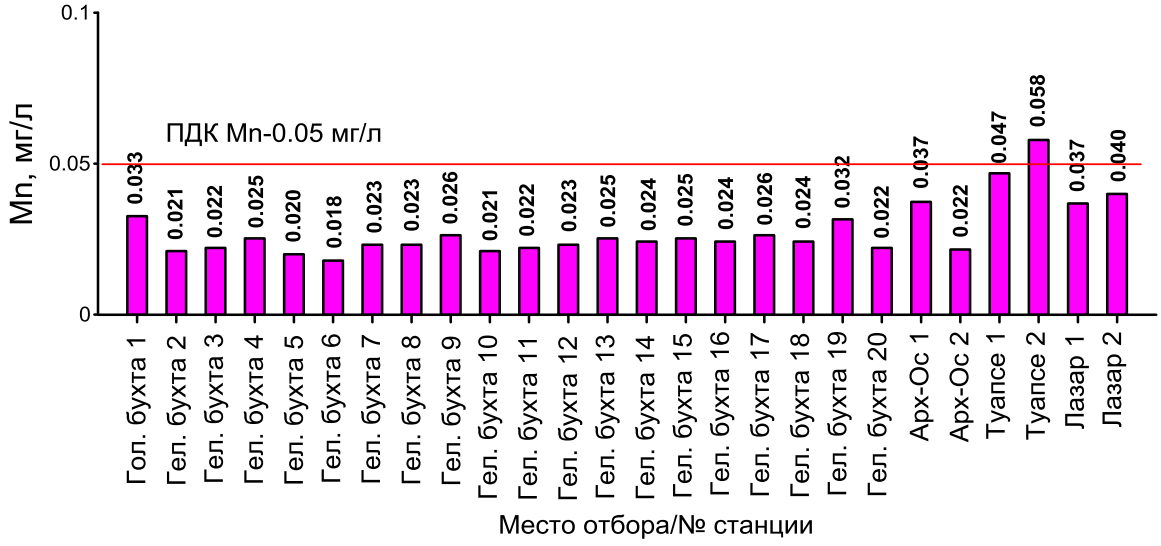


Рисунок 1.1.2.9 – Содержание Марганца (мг/л), май 2022 г.

Железо (Fe). Содержание железа изменялось от 0,008 до 0,029 мг/л, средняя концентрация составила 0,013 мг/л. Превышение ПДК по железу (ПДК Fe -50 мкг/л) не зафиксировано, среднее отношение С/ПДК составило 0.26 ПДК. Максимальные величины содержания железа, как и для марганца, находились в море в южной части побережья, в районе Архипо-Осиповка – Лазаревское (рисунок 1.1.2.10). В целом по полигону исследований наблюдаются низкие величины, что говорит о том, что акватория не загрязнена этим металлом.

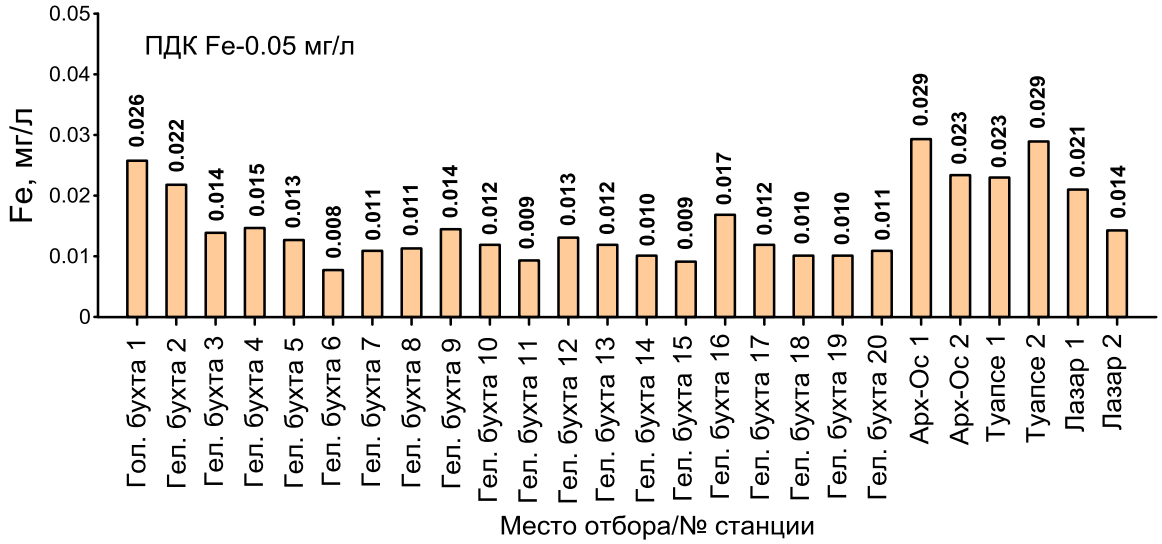


Рисунок 1.1.2.10 – Содержание Железа (мг/л), май 2022 г.

Хлорорганические пестициды (ХОП). Основное влияние на содержание ХОП в морской воде оказывают стоки рек суши и перенос из атмосферы. В морской воде в районе исследований определялись следующие ХОП: α-ГХЦГ, β-ГХЦГ, γ-ГХЦГ, гексахлорбензол, группа 4,4'-DDT, 4,4'-DDE, 4,4'-DDD. В первой весенней экспедиции анализ выполнен на 26 станциях в поверхностном слое воды. На исследуемой акватории все виды ХОП были обнаружены в концентрациях выше предела обнаружения 0,1 нг/дм³. В компонентах экосистемы пестициды подвергаются разложению с большей или меньшей скоростью. Однако некоторые пестициды отличаются высокой персистентностью (стойкостью вещества, которое характеризуется временем, в течение которого оно сохраняется в объектах окружающей среды в неизмененном состоянии). Это относится, прежде всего, к хлорорганическим пестицидам (ХОП), наиболее опасным представителем, которых является ДДТ (рисунок 1.1.2.11). Для ДДТ диапазон изменчивости в весенний сезон составил от аналитического нуля до 10.2 нг/дм³, при средней величине 0.1 нг/дм³. Следует отметить резко повышенные величины, зафиксированные на 6 станциях в Геленджикской бухте.

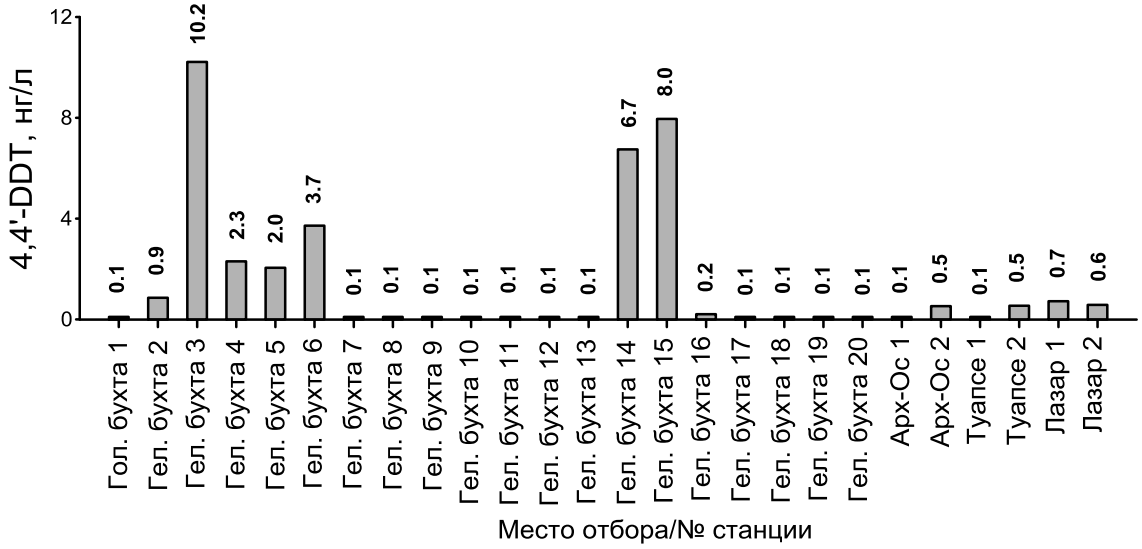


Рисунок 1.1.2.11 – Содержание DDT (нг/дм³) на поверхности, май 2022 г.

ДДТ длительное время может находится в объектах окружающей среды. Его метаболизм идет по двум направлениям: в одном варианте конечным продуктом является ДДД (рисунок 1.1.2.12), в другом – ДДЕ (рисунок 1.1.2.13). Первый вариант следует считать благоприятным, поскольку ДДД быстро разрушается, второй крайне нежелателен в связи с тем, что ДДЕ отличается исключительной устойчивостью в окружающей среде.

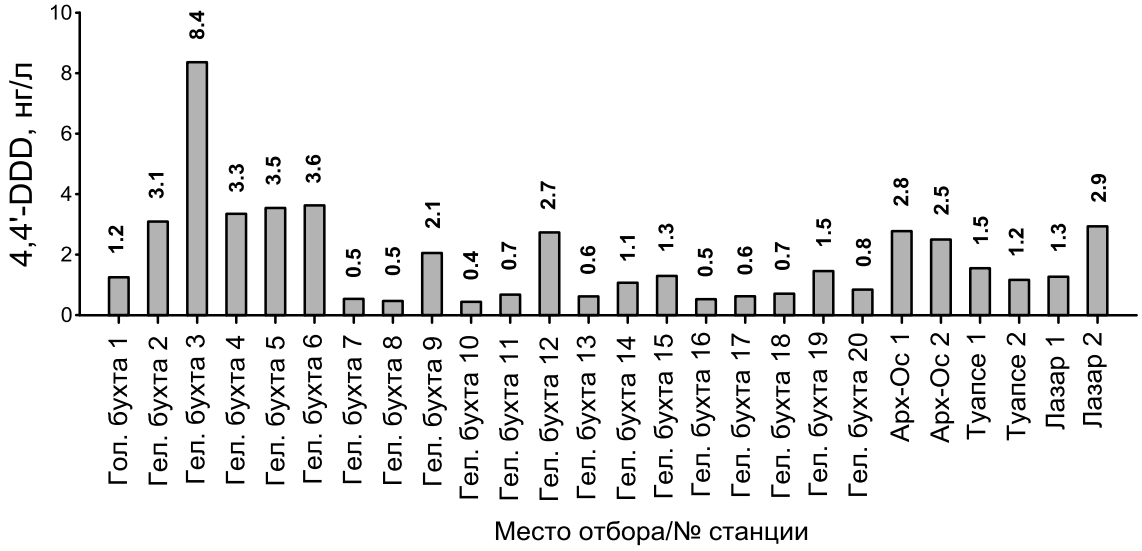


Рисунок 1.1.2.12 – Содержание DDD (нг/дм³) на поверхности, май 2022 г.

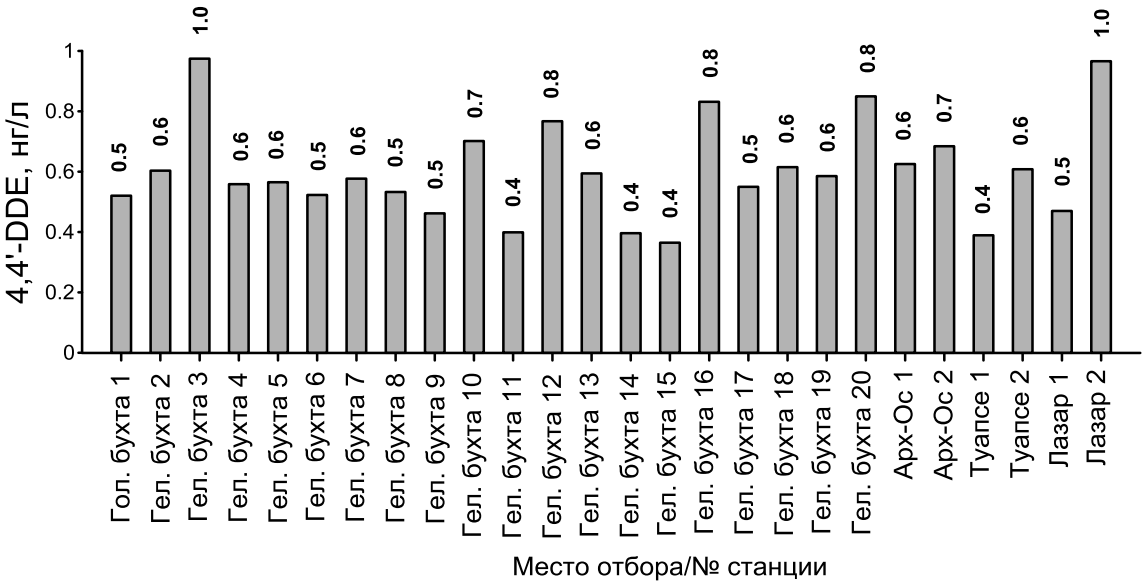


Рисунок 1.1.2.13 – Содержание DDE (нг/дм³) на поверхности, май 2022 г.

Для пестицидов (ХОП) в различных нормативных документах существуют сильно отличающиеся друг от друга значения ПДК. Существует минимальное значение содержания суммы ХОП для рыбохозяйственных водоемов (ПДК -10 нг/дм³), для отдельных видов ХОП предполагается их отсутствие в морской среде. Для суммы пестицидов (ΣХОП), мы можем сказать, что диапазон изменчивости на исследуемой акватории составил от 1.9 до 20.7 нг/дм³, при средней величине 5.6 нг/дм³. Для распределения ΣХОП на поверхности характерны повышенные величины в Геленджикской бухте (рисунок 1.1.2.14).

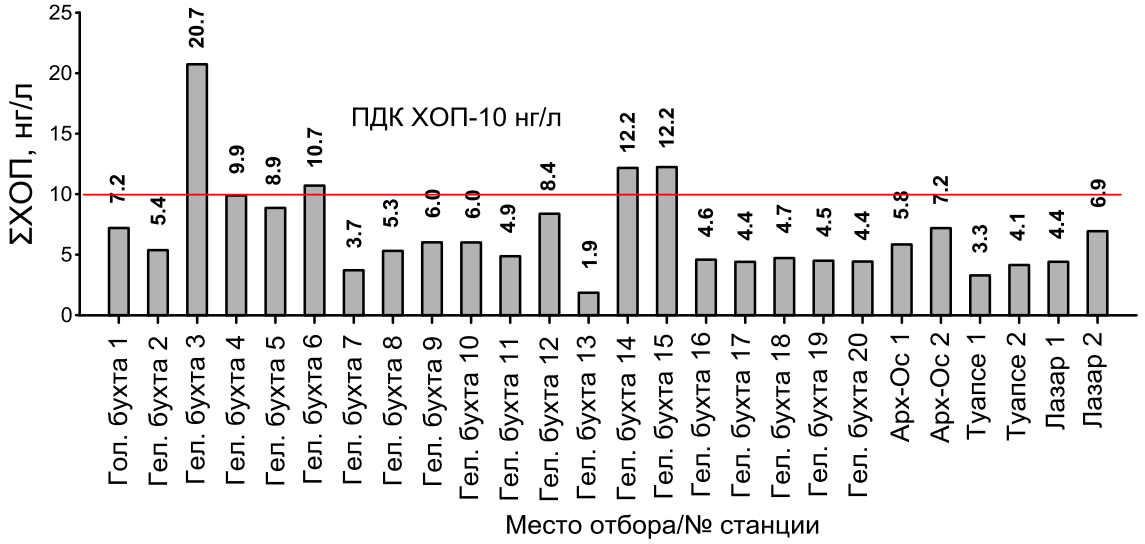


Рисунок 1.1.2.14 – Содержание суммы пестицидов Σ ХОП (нг/дм³), май 2022 г.

В 4 пробах было зафиксировано превышение официального ПДК (ΣХОП - 10

нг/дм³). Отношение С/ПДК среднего значения составляет 0,56 и 2,1 ПДК для максимального значения. Таким образом, в среднем по акватории превышение нормы Σ ХОП нет, наблюдаются отдельные локальные максимумы содержания, превышающие ПДК. Для отдельных видов ХОП, мы можем констатировать их наличие в морской среде, что является нарушением существующих норм.

Донные отложения

Для донных отложений морских акваторий в российских территориальных водах в настоящее время не существует нормативно закрепленных характеристик их качества по уровню концентраций загрязняющих веществ (ЗВ). Хотя содержание ЗВ в донных отложениях российскими нормативными документами не регламентируются, однако существует возможность оценивать степень загрязнения донных отложений в контролируемом районе на основе соответствия уровней содержания ЗВ критериям экологической оценки загрязненности грунтов по «голландским листам» (Neue Niederlandische Liste). Допустимые концентрации (ДК), в соответствии с зарубежными нормами, представлены в таблице 1.6.

Таблица 1.6 – Допустимые уровни концентраций (ДК) загрязняющих веществ в донных отложениях водоемов в соответствии с зарубежными нормами

Загрязняющие вещества	ДК*	Загрязняющие вещества	ДК*
Ртуть, мкг/г	0.3	Цинк, мкг/г	140
Медь, мкг/г	35	Свинец, мкг/г	85
Никель, мкг/г	35	Нефтепродукты, мкг/г	50
Кадмий, мкг/г	0.8	Бенз(а)пирен, нг/г	25
Кобальт, мкг/л	20	γ-ГХЦГ(линдан), нг/г	0.05 нг/г
Хром, мкг/л	100	Σ ДДТ, ДДД и ДДЭ, нг/г	2.5 нг/г

ДК* - Neue Niederlandische Liste. Altlasten Spektrum 3/95, Warmer H., van Dokkum R., 2002, Water pollution control in the Netherlands. Policy and practice 2001, RIZA report 2002.009, Lelystad, 77 p.

Уровень загрязнения донных отложений в прибрежной зоне зависит от многих факторов. В основном, от литологического типа осадка, его гранулометрического состава, глубины моря, свойств загрязняющих веществ (ЗВ) и уровня их поступления с берега, гидрологических условий, системы течений и т.д. В наиболее тонкодисперсных алевритовых и пелитовых осадках отмечаются, как правило, более повышенные содержания ЗВ, чем в песках. Однако, для определенных видов ЗВ есть свои особенности, например, максимумы распределения кадмия тяготеют к крупноалевритовым фракциям. Общая картина распределения полей ЗВ, в конкретной акватории, является результатом взаимодействия различных факторов, имеет

наложенный характер, охватывая различные типы осадков, причем каждый тип ЗВ обнаруживает определенное своеобразие количественного распределения.

Весной 2022 года, для оценки экологического состояния донных отложений морской акватории вдоль северо-восточного побережья Черного моря определены тяжелые металлы и пестициды (ХОП). Уровни содержания загрязняющих веществ исследованы в поверхностном слое (0-5 см) на 14 станциях. В таблице 1.7 приводятся минимальные, максимальные и средние величины, зафиксированные во время выполненных работ в весенний сезон. Зафиксированные превышения ДК выделены в таблице цветом. Устойчивое превышение ДК по средним величинам на всей акватории исследований, в весенний сезон, наблюдается по γ-ГХЦГ. Отдельные превышения в донных отложениях зафиксированы для содержания Σ (DDE, DDD, DDT).

Таблица 1.7 – Минимальные, максимальные и средние значения содержания загрязняющих веществ в донных отложениях, Геленджик-Лазаревское, май 2022 г.

Параметр/весна	Минимум	Максимум	Среднее	ДК*
Железо (Fe), мг\г	6.33	15.85	9.19	-
Марганец (Mn), мг\г	0.20	0.51	0.27	-
Медь(Cu), мкг\г	2.49	32.88	6.24	35
Цинк (Zn), мкг\г	11.64	57.86	20.25	140
Кобальт (Co), мкг\г	2.43	7.67	3.33	20
Кадмий (Cd), мкг\г	0.020	0.178	0.020	0.8
Никель (Ni), мкг\г	3.26	26.32	7.64	35
Хром (Cr), мкг\г	0.15	5.25	0.15	100
Свинец (Pb), мкг\г	1.46	11.44	5.16	85
ГХБ, нг/г	0.1	4.6	0.2	-
α-ГХЦГ (α-HCH), нг/г	0.1	0.5	0.1	-
γ-ГХЦГ (γ-HCH), нг/г	0.1	1.9	0.4	0.05
β-ГХЦГ (β-HCH), нг/г	0.1	0.1	0.1	-
4,4'-DDE, нг/г	0.1	9.6	1.1	-
4,4'-DDD, нг/г	0.1	2.4	0.2	-
4,4'-DDT, нг/г	0.1	2.4	0.1	-
Σ (DDE, DDD, DDT), нг/г	0.1	14.0	1.3	2.5
ΣХОП (Σ Pesticides), нг/г	0.1	19.1	1.9	-

ДК** - допустимые уровни концентраций (ДК) загрязняющих веществ в донных отложениях водоемов в соответствии с зарубежными нормами (Neue Niederlandische Liste. Altlasten Spektrum 3/95)

Свинец (Pb). Концентрация свинца в исследуемых осадках изменялась в диапазоне от 1.46 до 11.44 мкг/л, средняя концентрация составила 5.16 мкг/г. Величина ДК* для свинца – 85 мкг/г (таблица 1.6), согласно «голландским листам» [Neue Niederlandische Liste. Altlasten Spektrum 3/95], превышение нормы не обнаружено. Отношение С/ДК среднего значения составляет 0.06 и 0.13 ДК для максимального значения. Наиболее загрязненные свинцом участки донных отложений приходятся на акваторию Геленджикской бухты (рисунок 1.1.2.15). Зафиксированные значения свинца в период наблюдений соответствуют средним климатическим величинам для осадков Черного моря.

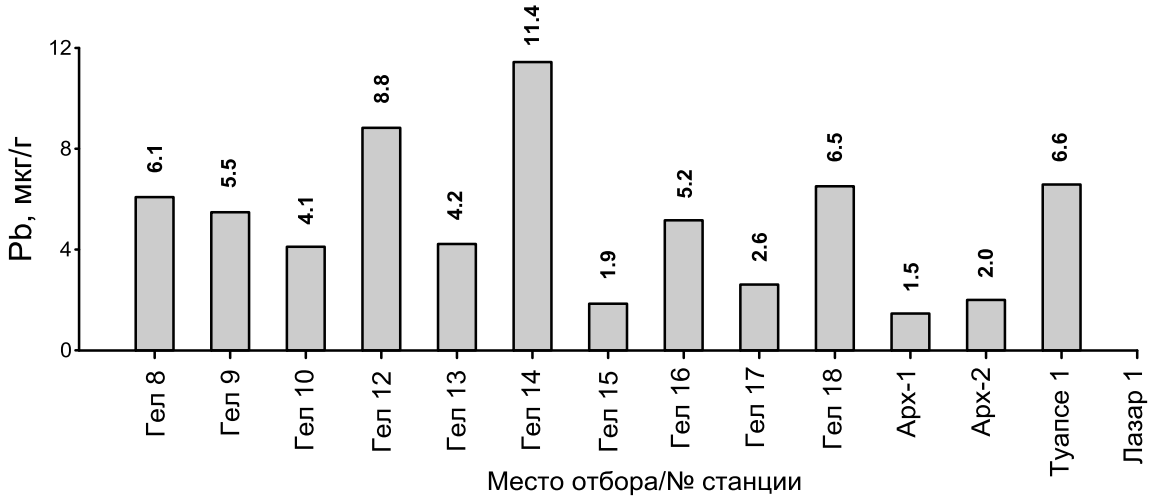


Рисунок 1.1.2.15 – Содержание свинца (мкг/г) в донных отложениях, май 2022 г.

Кадмий (Cd). Содержание кадмия в донных отложениях выше предела обнаружения наблюдалось на 3 станциях - 21 % от всех проб. Превышение ДК (ДК Cd -0.8 мкг/г) не зафиксировано. Концентрация кадмия на станциях опробования в морской акватории изменялась от аналитического нуля до 0.178 мкг/г, средняя концентрация составила 0.020 мкг/г, соответственно 0.03 ДК. Общий повышенный фон содержания кадмия ровный, за исключением одной станции в Геленджикской бухте. В целом по исследованной акватории концентрации кадмия в осадках значительно ниже допустимого уровня.

Медь (Cu). Содержание меди было больше нижнего предела обнаружения во всех пробах (100%). Концентрация меди изменялась в диапазоне от 2.49 до 32.88 мкг/г, средняя концентрация 6.24 мкг/г. Превышение ДК не зафиксировано. В целом, для исследуемой акватории характерен фон содержания меди в осадках с концентрациями, не превышающими значение ДК Cu - 35 мг/кг по «голландским листам». Отношение С/ДК

среднего значения составляет 0.18 и 0.94 ДК для максимального значения. На фоне достаточно ровного распределения меди в осадках (средняя величина 6,24 мкг/г) в Геленджикской бухте зафиксирована аномалия превышения среднего значения на станции 14 (Cu=32,9 мкг/г). По отношению к общему фону, повышенные величины меди в осадках зафиксированы в Туапсе (рисунок 1.1.2.16).

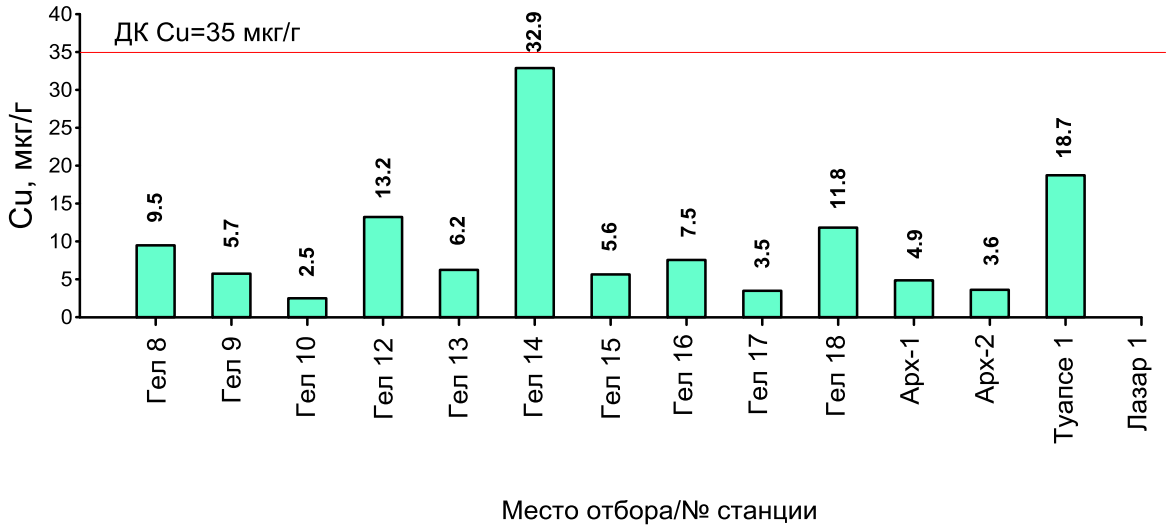


Рисунок 1.1.2.16 – Содержание меди (мкг/г) в донных отложениях, май 2022 г.

Цинк (Zn). Диапазон изменчивости концентраций этого металла колебался от 11.64 до 57.86 мкг/г, средняя концентрация составила 20.25 мкг/г. Превышение допустимых концентраций ДК. (Zn- 140 мкг/г) во всей пробах грунта согласно «голландским листам» не обнаружено [Neue Niederlandische Liste. Altlasten Spektrum 3/95]. Отношение С/ДК среднего значения составляет 0.14 и 0.41 ДК для максимального значения. Распределение по станциям достаточно ровное, повышенные величины наблюдаются в тех же пробах, что и для меди - на станции 14 и Туапсе.

Никель (Ni). Превышение ДК (ДК Ni - 35 мкг/г) не зафиксировано. Концентрация никеля на станциях опробования в морской акватории изменялась от 3.26 до 26.32 мкг/г, средняя концентрация составила 7.64 мкг/г, соответственно 0.22 ДК. Общий фон содержания никеля не высокий, за исключением одной станции 14 в Геленджикской бухте. В целом по исследованной акватории концентрации Ni в осадках ниже допустимого уровня.

Хром (Cr). Превышение ДК (ДК Cr - 100 мкг/г) не зафиксировано. Концентрация хрома на станциях опробования изменялась от аналитического нуля до 5.25 мкг/г, средняя концентрация составила 0.15 мкг/г. Общий фон содержания хрома очень низкий,

значащие концентрации, выше предела обнаружения, зафиксированы только на трех станциях (рисунок 1.1.2.17). Повышенное содержание, как и остальных металлов, зафиксированы на станции 14 в Геленджикской бухте и в Туапсе. В целом, донные осадки акватории не загрязнены этим металлом.

Рисунок 1.1.1.17 – Содержание хрома (мкг/г) в донных отложениях, май 2022 г.

Кобальт (Co), Превышение ДК (ДК Co - 20 мкг/г) не зафиксировано. Концентрация кобальта на станциях опробования в морской акватории изменялась от 2.43 до 7.67 мкг/г, средняя концентрация составила 3.33 мкг/г, соответственно 0.17 ДК. Общий повышенный фон содержания кадмия ровный, не высокий за исключением одной станции в Геленджикской бухте. По исследованной акватории концентрации кобальта в осадках ниже допустимого уровня.

Марганец (Mn). Концентрация марганца в осадках изменялась от 0,20 до 0,51 мг/г. Средняя концентрация составила 0,27 мг/г. В целом, по району исследований, содержание марганца в осадках относительно равномерное, с увеличением концентраций к юго-востоку в районе Туапсе. Величина марганца в донных отложениях не лимитирована.

Железо (Fe). Содержание железа изменялось от 6.33 до 15.85 мг/г, средняя концентрация составила 9.19 мг/г. Распределение железа в осадках по району исследований, практически соответствует особенностям распределения марганца, т.е. максимальные концентрации Fe приурочены к южной части кавказкого побережья. Содержание железа в донных отложениях не лимитировано.

Хлорорганические пестициды (ХОП). В донных осадках по исследуемому полигону определялись следующие ХОП: α, β, γ - изомеры гексахлорциклогексана (ГХЦГ),

гексахлорбензол (ГХБ), ДДТ и его метаболиты ДДД и ДДЕ. Анализ выполнен на 14 станциях.

На исследуемой акватории обнаружены все виды ХОП, кроме β-ГХЦГ. Содержание β-ГХЦГ во всех образцах была ниже предела обнаружения <0.1 нг/г (Табл. 3.5). Таким образом, наши исследования показали, что на акватории обнаружены шесть вида хлорорганических пестицидов из 7 изученных видов ХОП.

Содержание ДДЕ, выше чувствительности метода определения ХОП (<0.1 нг/г) было обнаружено в 11 точках, ДДД – в 7 точках и ДДТ – в 5 пробах. Суммарное содержание ДДТ и его метаболитов ДДЕ и ДДД изменялось в диапазоне от 0.1 до 14.0 нг/г, средняя величина составила 1.3 нг/г. Таким образом, в изученной акватории Черного моря максимальное содержание суммы Σ DDE, DDD, DDT в 5.6 раза выше ДК, которое составляет 2.5 нг/г (табл. 3.4), согласно «голландским листам» [Neue Niederlandische Liste. Altlasten Spektrum 3/95].

Всего, во время весенней экспедиции, превышение норматива по содержанию Σ DDE, DDD, DDT в осадках, зафиксировано на пяти станциях (рисунок 1.1.2.18).

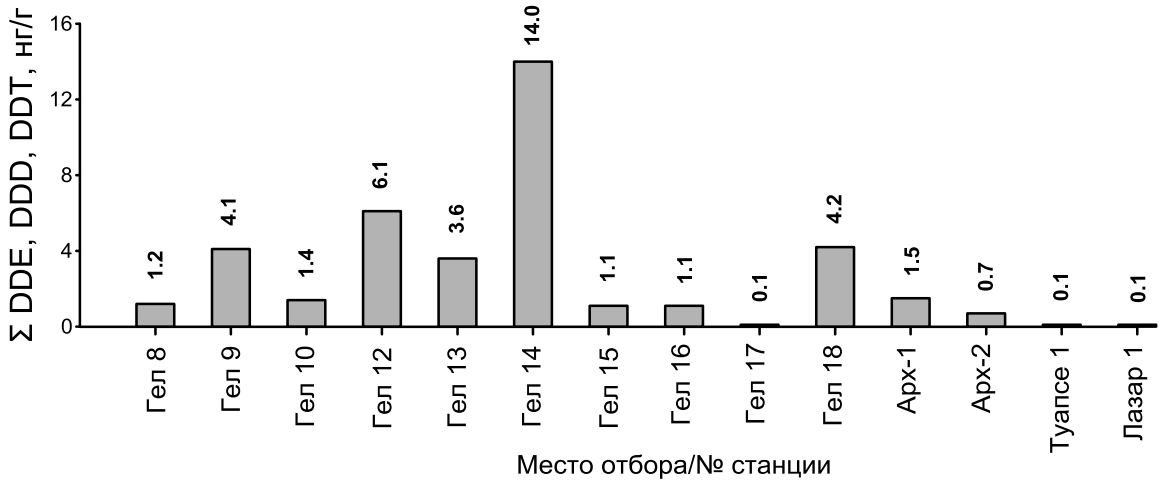


Рисунок 1.1.2.18. Содержание Σ DDE, DDD, DDT (нг/г) в осадках, май 2022 г.

Согласно «голландским листам», норма ДК в осадках для пестицидов существует еще на γ-ГХЦГ (линдан) и этот норматив составляет 0.05 нг/г. Из 14 проб в 8 был обнаружен линдан в концентрациях превышающих эту норму. Для остальных отдельных видов ХОП допустимые концентрации (ДК) отсутствует. Для суммы всех пестицидов (ΣХОП), мы можем сказать, что диапазон изменчивости на исследуемой акватории составил от 0.1 до 19.1 нг/г, при средней величине 1.9 нг/г.

Для распределения ΣХОП в осадках характерны повышенные величины в Геленджикской бухте (рисунок 1.1.2.19) и уменьшение величин на юг вдоль побережья.

Для остальных видов ХОП в донных отложениях (при отсутствии ДК), мы можем констатировать их стабильное наличие в морской среде.

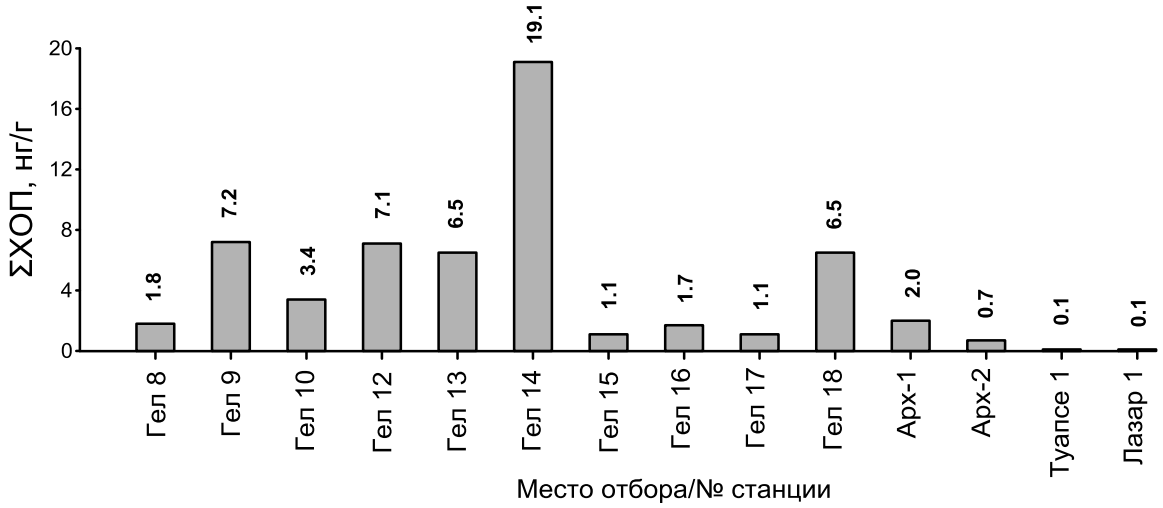


Рисунок 1.1.2.19 Содержание Σ ХОП (нг/г) в донных отложениях, май 2022 г.

Вторая экспедиция - осень 2022 года.

Морская вода

Как и в первой весенней экспедиции, в сентябре 2022 года были определены аналогичные загрязняющие вещества (Тяжелые металлы - Cu, Zn, Cd, Pb, Cr, Ni, Co, Mn, Fe пестициды (ХОП: α-ГХЦГ, β-ГХЦГ, γ-ГХЦГ, гексахлорбензол, 4,4'-DDT, 4,4'-DDE, 4,4'-DDD) и детергенты (Анионные поверхностно-активные вещества, АПАВ). Полигон исследований охватывал акваторию от Севастополя - Керченского пролива (г.Керчь) до Большого Сочи (п.Лазаревский). Отобрано 37 проб воды. Схема расположения станций представлена на рисунке 1.8.

В таблице 1.8 приводятся минимальные, максимальные и средние величины, зафиксированные во время выполненных работ и их сравнение с нормами ПДК. Зафиксированные превышения ПДК выделены в таблице серым цветом.

Таблица 1.8 – Минимальные, максимальные и средние значения содержания загрязняющих веществ в воде, Севастополь - Лазаревское, сентябрь 2022 г.

Параметр/осень	Минимум	Максимум	Среднее	ПДК*
Железо (Fe), мг\л	0.005	0.044	0.008	0.05 мг/л
Марганец (Mn), мг\л	0.011	0.070	0.021	0.05 мг/л
АПАВ*, мг/л	0.026	0.072	0.042	0.1 мг/л
Медь(Cu), мкг\л	1.67	20.82	3.89	5 мкг/л

Цинк (Zn), мкг\л	0.57	67.94	2.84	50 мкг/л
Кадмий (Cd), мкг\л	0.20	0.76	0.20	10 мкг/л
Свинец (Pb), мкг\л	0.25	3.68	1.85	10 мкг/л
Никель (Ni), мкг\л	3.00	19.22	3.00	10 мкг/л
Кобальт (Co), мкг\л	3.00	4.78	3.00	5 мкг/л
Хром (Cr), мкг\л	1.5	13.2	1.50	20 мкг/л
ГХБ, нг/дм³	0.4	2.3	1.0	Отсутствие
α-ГХЦГ (α-HCH), нг/дм³	0.1	13.8	1.0	Отсутствие
γ-ГХЦГ (γ-HCH), нг/дм³	0.1	3.1	0.4	Отсутствие
β-ГХЦГ (β-HCH), нг/дм³	0.1	7.0	0.1	Отсутствие
4,4'-DDE, нг/дм³	0.1	32.2	0.1	Отсутствие
4,4'-DDD, нг/дм³	0.1	2.5	0.1	Отсутствие
4,4'-DDT, нг/дм³	0.1	2.4	0.1	Отсутствие
Σ (DDE, DDD, DDT),	0.1	32.2	0.2	Отсутствие
ΣХОП (Σ Pesticides),	0.9	45.2	3.9	10 нг/дм³

АПАВ* - Анионные поверхностно-активные вещества

ПДК* - по «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения» ПРИКАЗ от 13 декабря 2016 года N 552 МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ (с изменениями на 12 октября 2018 года)

В сентябре, превышение ПДК в воде, наблюдалось по среднему содержанию ряда пестицидов. Выше нормы, за период наблюдений, зафиксированы максимальные значения для – марганца, меди, цинка и никеля. Остальные техногенные загрязнения находились в концентрациях ниже норм ПДК.

Для пестицидов (ХОП) в различных нормативных документах существуют сильно отличающиеся друг от друга значения ПДК. Существует минимальное значение содержания суммы ХОП для рыбохозяйственных водоемов (ПДК -10 нг/л), для отдельных изомеров предполагается их отсутствие в морской среде. Поэтому, следует отметить наличие стабильного фона стойких органических загрязнителей (СОЗ) в виде различных индивидуальных ХОП в водах исследуемых акваторий.

На рисунках 1.1.2.20 – 1.1.2.23 представлен пример распределения детергентов, металлов и пестицидов в водах исследованных акваторий в осенний период.

Детергенты (АПАВ)

Концентрации анионных поверхностно-активных веществ, в сентябре 2022 года, не превышали ПДК (ПДКр.х. АПАВ – 0.1 мг/л). Средняя концентрация анионных СПАВ за период наблюдений, составила 0.042 мг/л (0,42 ПДК), максимальное значение 0,072 мг/л

зафиксировано на станции возле г. Анапа (рис. 3.18). Повышенные, относительно средних значений, величины детергентов были характерны для Севастополя, Керчи, Анапы и Новороссийска. В целом, акватория района исследований не подвержена стойкому загрязнению поверхностно-активными веществами.

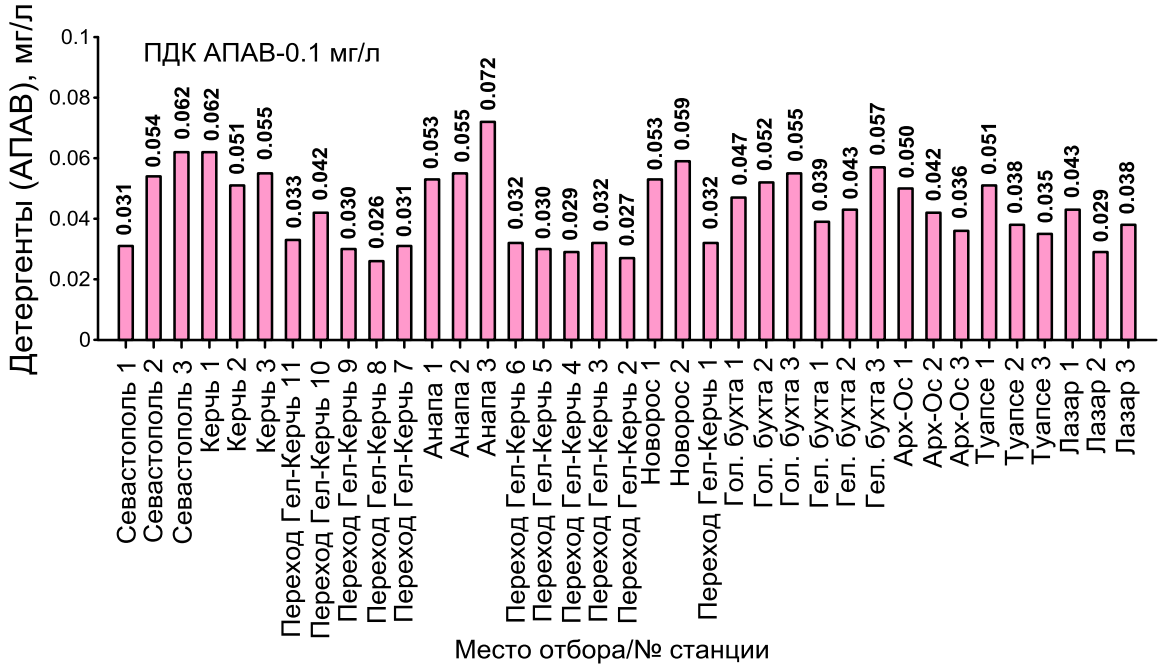


Рисунок 1.1.2.20 – Содержание АПАВ (мг/л) в воде, сентябрь 2022 г.

Металлы

Выполненные исследования содержания металлов показали, что за период наблюдений, выше норм ПДК зафиксирован ряд значения для – марганца, меди, цинка и никеля.

Наибольшее число превышений характерно для содержания меди, для этого металла превышение норм ПДК обнаружено в 11 пробах (рисунок 1.1.2.21). Следует отметить, что для прибрежной зоны Черного моря фоновое содержание меди, как правило, находится на уровне близком к существующей норме ПДК.

Кроме меди, за осенний период, превышение ПДК по тяжелым металлам (ТМ) зафиксировано для никеля в 7 пробах, для марганца и цинка по одной пробе, величины остальных ТМ находились в концентрациях ниже норм ПДК (табл. 3.6).

Пример распределения цинка, представлен на рисунке 1.1.2.22, где в районе Севастополя было зафиксировано аномально высокая концентрация, превышающая ПДК. В содержании цинка еще одно высокое значение обнаружено на станции Анапа 1, для

остальных величин вдоль всего побережья характерно равномерное содержание на уровне средних значений.

В целом, для металлов можно отметить повышенные величины на станциях Севастополя, Керчи, Анапы, Новороссийска.

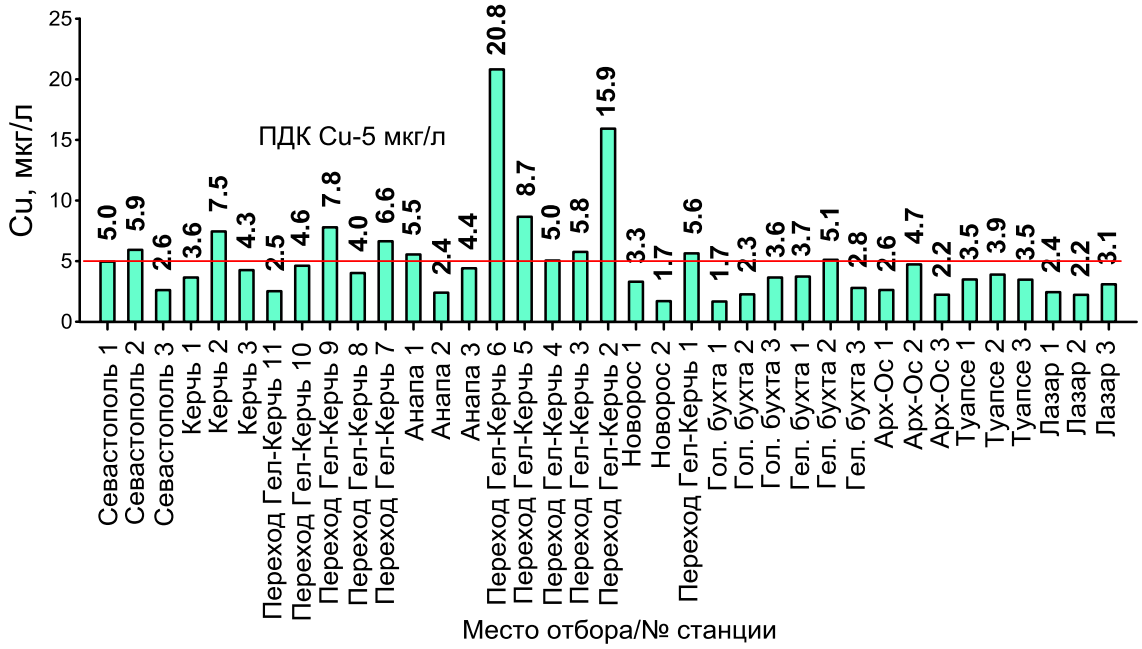


Рисунок 1.1.2.21 – Содержание меди (мкг/л) в воде, сентябрь 2022 г.

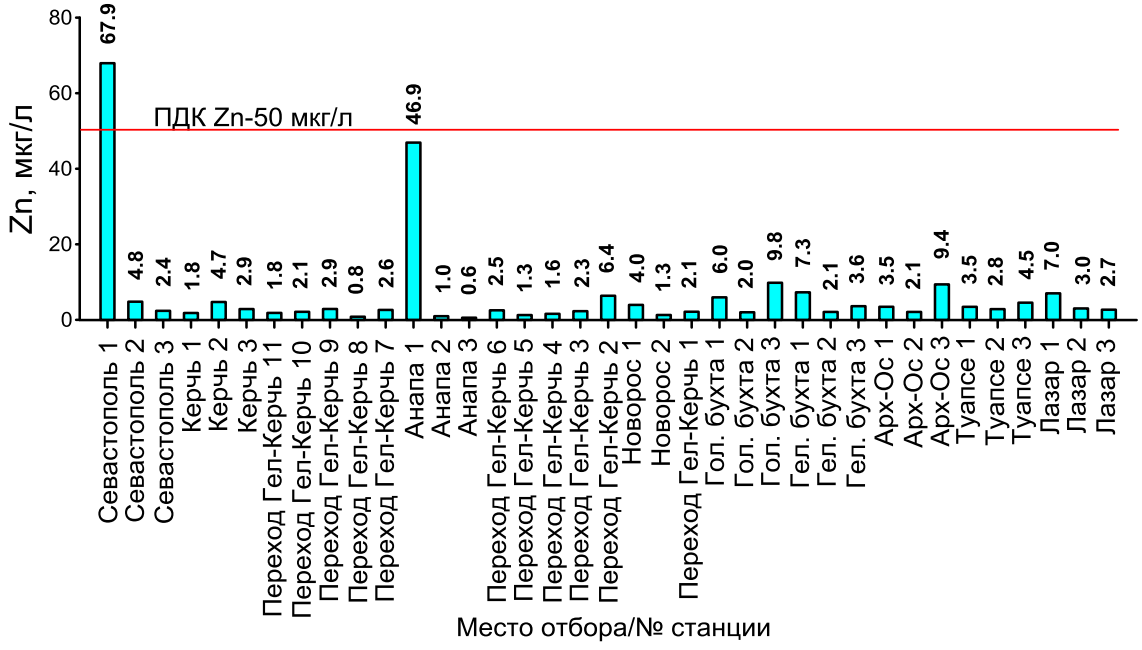


Рисунок 1.1.2.22 Содержание цинка (мкг/л) на поверхности, сентябрь 2022 г.

Хлорорганические пестициды (ХОП).

В морской воде определялись следующие ХОП: α-ГХЦГ, β-ГХЦГ, γ-ГХЦГ, гексахлорбензол (ГХБ), группа 4,4'-DDT, 4,4'-DDE, 4,4'-DDD. В сентябре анализ выполнен на 37 станциях.

На исследуемой акватории все виды ХОП были обнаружены в концентрациях выше предела обнаружения 0,1 нг/дм³, но в чуть меньших количествах чем в первую экспедицию весной (табл. 3.3 и 3.6). Временная изменчивость содержания пестицидов может быть связана с рядом различных факторов, как с количеством осадков и объёмов стоков с суши, так и временем обработки химикатами виноградников и других сельхозугодий.

Для суммы пестицидов (ΣХОП), мы можем сказать, что диапазон изменчивости на исследуемой акватории составил от 0.9 до 45.2 нг/дм³, при средней величине 3.9 нг/дм³.

Для распределения ΣХОП на поверхности вдоль побережья характерны повышенные величины на станциях Гел-Керчь2 (это в районе Новороссийска) и Туапсе 2 и Туапсе 3 (рисунок 1.1.2.23).

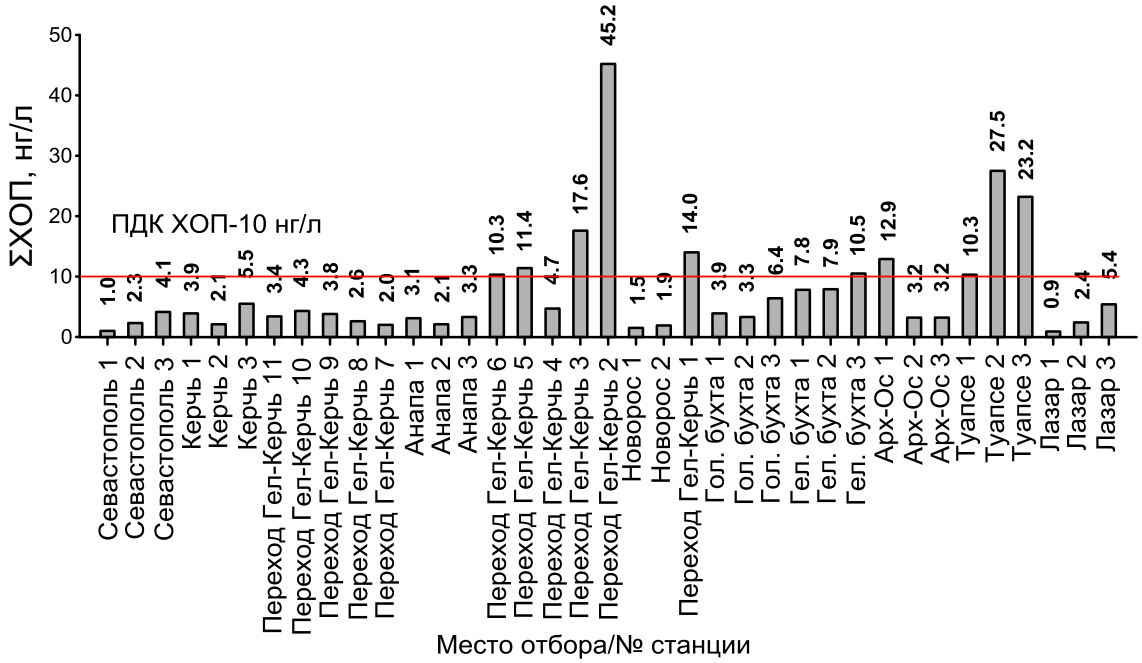


Рисунок 1.1.2.23 – Содержание суммы пестицидов Σ ХОП (нг/дм³), сентябрь 2022 г.

В 10 пробах было зафиксировано превышение официального ПДК (ΣХОП - 10 нг/дм³). Отношение С/ПДК среднего значения составляет 0,39 и 4,5 ПДК для максимального значения. Таким образом, в среднем по акватории превышение нормы Σ ХОП нет, наблюдаются отдельные локальные максимумы содержания, превышающие

ПДК.

Для отдельных видов ХОП, мы можем констатировать их наличие в морской среде, что является нарушением существующих норм.

Донные отложения

Осенью 2022 года, для оценки экологического состояния донных отложений морской акватории вдоль северо-восточного побережья Черного моря определены тяжелые металлы и пестициды (ХОП). Уровни содержания загрязняющих веществ исследованы в поверхностном слое (0-5 см) на 12 станциях опробования.

В таблице 3.7 приводятся минимальные, максимальные и средние величины, зафиксированные во время выполненных работ в осенний сезон. Зафиксированные превышения ДК выделены в таблице цветом.

Таблица 3.7. Минимальные, максимальные и средние значения содержания загрязняющих веществ в донных отложениях, Керчь-Лазаревское, сентябрь 2022 г.

Параметр/осень	Минимум	Максимум	Среднее	ДК*
Железо (Fe), мг\г	5.78	14.50	9.43	-
Марганец (Mn), мг\г	0.10	0.38	0.26	-
Медь(Cu), мкг\г	2.79	22.49	10.45	35
Цинк (Zn), мкг\г	4.65	67.53	26.08	140
Кобальт (Co), мкг\г	0.32	6.02	2.29	20
Кадмий (Cd), мкг\г	0.020	0.160	0.066	0.8
Никель (Ni), мкг\г	3.59	162.6	9.19	35
Хром (Cr), мкг\г	0.15	4.09	0.15	100
Свинец (Pb), мкг\г	0.46	13.99	5.41	85
ГХБ, нг/г	0.1	32.2	0.1	-
α-ГХЦГ (α-HCH), нг/г	0.1	0.7	0.1	-
γ-ГХЦГ (γ-HCH), нг/г	0.1	0.5	0.1	0.05
β-ГХЦГ (β-HCH), нг/г	0.1	0.1	0.1	-
4,4'-DDE, нг/г	0.1	8.5	0.1	-
4,4'-DDD, нг/г	0.1	14.9	0.1	-
4,4'-DDT, нг/г	0.1	44.1	0.1	-
Σ (DDE, DDD, DDT), нг/г	0.0	67.5	0.3	2.5
ΣХОП (Σ Pesticides), нг/г	0.2	68.1	1.8	-

ДК* - допустимые уровни концентраций (ДК) загрязняющих веществ в донных отложениях водоемов в соответствии с зарубежными нормами (Neue Niederlandische Liste. Altlasten Spektrum 3/95)

Устойчивое превышение ДК по средним величинам на всей акватории

исследований, в осенний сезон, не наблюдается. Отдельные превышения в донных отложениях зафиксированы для содержания никеля, γ-ГХЦГ (линдан) и Σ (DDE, DDD, DDT).

Металлы

Выполненные исследования содержания металлов в осадках показали, что за период наблюдений, выше норм ПДК зафиксировано только одно значение для никеля (рисунок 1.1.2.24). Аномально высокая величина приурочена к станции Гел. Бухта 1. В содержании остальных тяжелых металлов превышение норм ДК не зафиксировано (табл. 3.7). Пример распределения никеля и кадмия, в осенний сезон, представлен на рисунках 1.1.2.24 и 1.1.2.25.

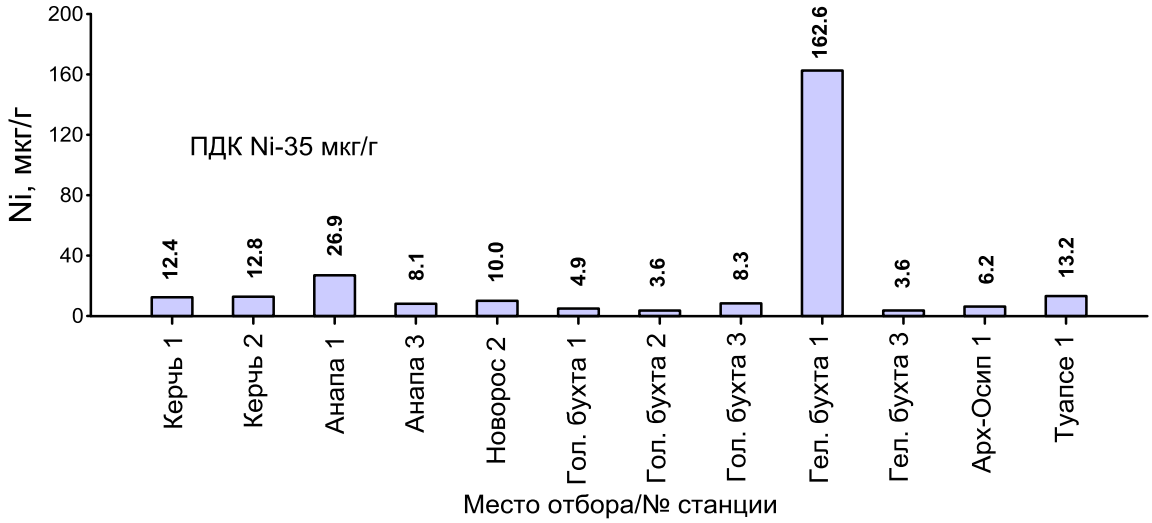


Рис. 1.1.2.24 – Содержание никеля (мкг/г) в донных отложениях, сентябрь 2022 год.

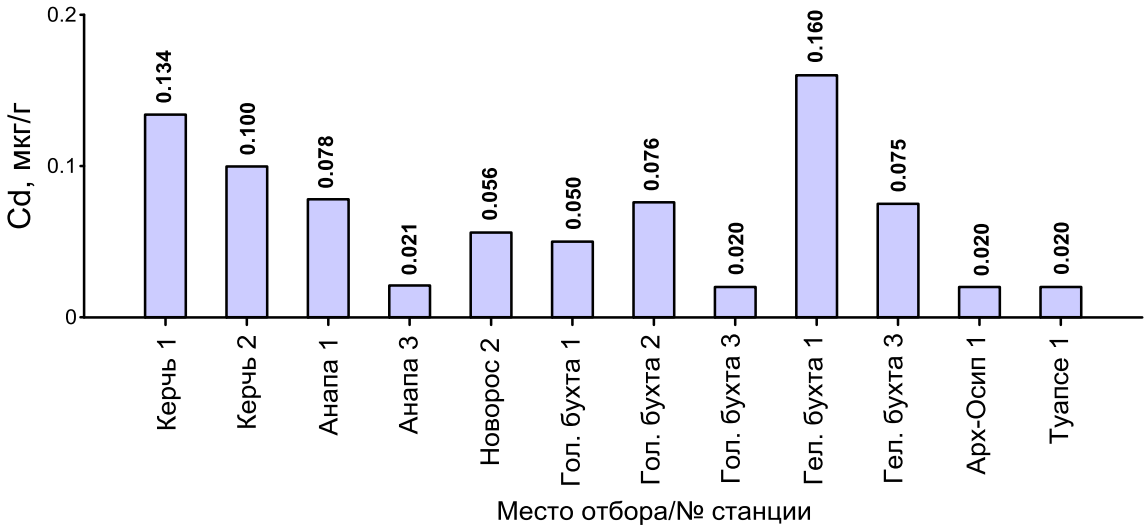


Рисунок 1.1.2.25 – Содержание кадмия (мкг/г) в донных отложениях, сентябрь 2022 г.

В целом, для металлов можно отметить повышенные величины на станциях Керчи, Новороссийска, Геленджика.

Хлорорганические пестициды (ХОП).

В осадках определялись следующие ХОП: α-ГХЦГ, β-ГХЦГ, γ-ГХЦГ, гексахлорбензол (ГХБ), группа 4,4'-DDT, 4,4'-DDE, 4,4'-DDD. В сентябре анализ выполнен на 12 станциях.

На исследуемой акватории обнаружены все виды ХОП, кроме β-ГХЦГ. Содержание β-ГХЦГ во всех образцах была ниже предела обнаружения <0.1 нг/г (Табл. 3.7). Таким образом, наши исследования показали, что на акватории обнаружены шесть видов хлорорганических пестицидов из 7 изученных видов ХОП.

Суммарное содержание ДДТ и его метаболитов ДДЕ и ДДД изменялось в диапазоне от 0.1 до 67.5 нг/г, средняя величина составила 0.3 нг/г. Таким образом, в изученной акватории Черного моря максимальное содержание суммы Σ DDE, DDD, DDT в 5.6 раза выше ДК, которое составляет 2.5 нг/г (табл. 3.4), согласно «голландским листам» [Neue Niederlandische Liste. Altlasten Spektrum 3/95].

Всего, во время осенней экспедиции, превышение норматива по содержанию Σ DDE, DDD, DDT в осадках, зафиксировано на четырех станциях (рисунок 1.1.2.26).

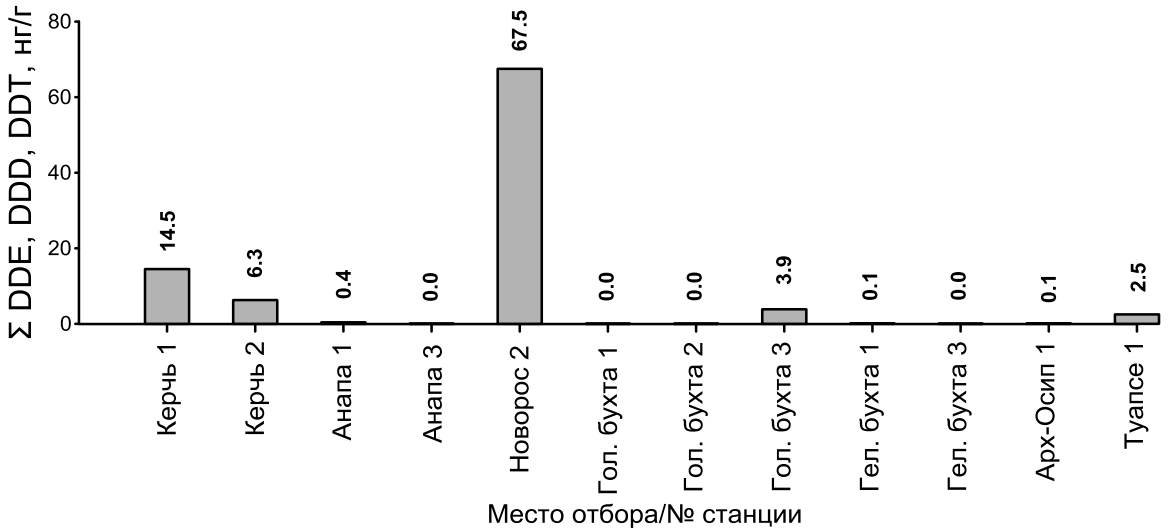


Рисунок 1.1.2.26 – Содержание Σ DDE, DDD, DDT (нг/г) в осадках, сентябрь 2022 г.

Аномально высокой значение зафиксировано на станции Новороссийск 2.

Согласно «голландским листам», норма ДК в осадках для пестицидов существует еще на γ-ГХЦГ (линдан) и этот норматив составляет 0.05 нг/г. Из 12 проб в 4 был обнаружен линдан в концентрациях превышающих эту норму.

Для остальных отдельных видов ХОП допустимые концентрации (ДК) отсутствует.

Для суммы всех пестицидов (ΣХОП), мы можем сказать, что диапазон изменчивости на исследуемой акватории составил от 0.2 до 68.1 нг/г, при средней величине 1.8 нг/г. Для распределения ΣХОП в осадках характерны повышенные величины в Керчи (рисунок 1.1.2.27) и Новороссийске.

Для остальных видов ХОП в донных отложениях (при отсутствии ДК), мы можем констатировать их стабильное наличие в морской среде (рис. 27-35, Прил. В).

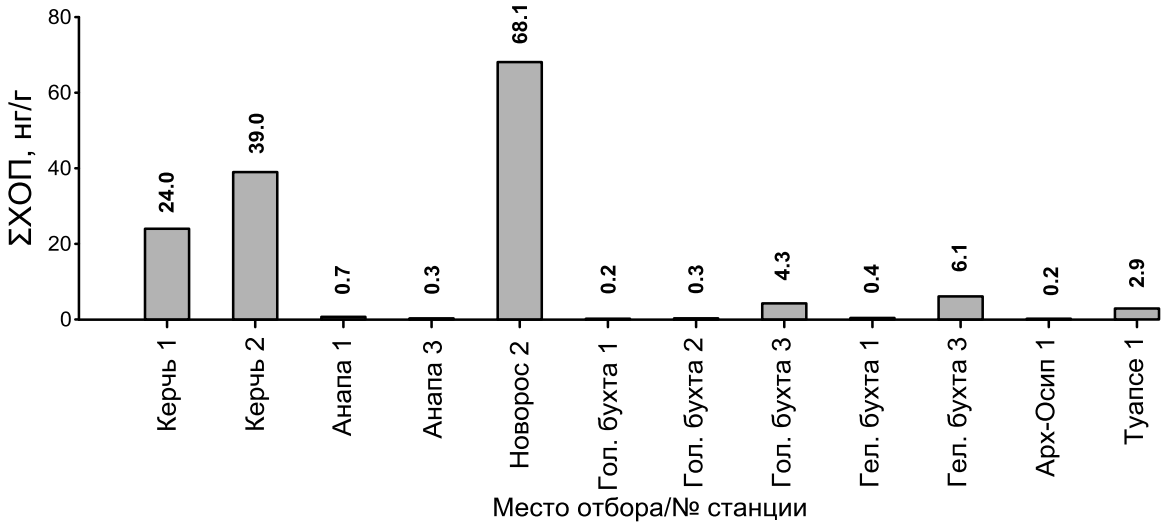


Рисунок 1.1.2.27 – Содержание Σ ХОП (нг/г) в донных отложениях, сентябрь 2022 г.

Третья экспедиция - зима 2022 года.

Морская вода

Как и в предыдущих экспедициях, в декабре 2022 года были определены аналогичные загрязняющие вещества (Тяжелые металлы - Cu, Zn, Cd, Pb, Cr, Ni, Co, Mn, Fe пестициды (ХОП: α-ГХЦГ, β-ГХЦГ, γ-ГХЦГ, гексахлорбензол, 4,4'-DDT, 4,4'-DDE, 4,4'-DDD) и детергенты (Анионные поверхностно-активные вещества, АПАВ).

Полигон исследований охватывал акваторию от Керченского пролива (г.Керчь) до Большого Сочи (п.Лазаревский). В зимний сезон, отобрано 32 пробы воды. Схема расположения станций представлена на рисунке 1.1.2.1.

В таблице 3.8 приводятся минимальные, максимальные и средние величины, зафиксированные во время выполненных работ и их сравнение с нормами ПДК. Зафиксированные превышения ПДК выделены в таблице серым цветом.

В декабре, превышение ПДК в воде, наблюдалось по среднему содержанию меди, никеля, кобальта и индивидуальных изомеров пестицидов. Кроме этих параметров, выше нормы, за период наблюдений, зафиксированы максимальные значения для – марганца и железа.

Таблица 3.8. Минимальные, максимальные и средние значения содержания загрязняющих веществ в воде, Керчь - Лазаревское, декабрь 2022 г.

Параметр/зима	Минимум	Максимум	Среднее	ПДК*
Железо (Fe), мг\л	0.004	0.060	0.018	0.05 мг/л
Марганец (Mn), мг\л	0.012	0.119	0.037	0.05 мг/л
АПАВ*, мг/л	0.015	0.046	0.029	0.1 мг/л
Медь(Cu), мкг\л	1.34	8.63	5.22	5 мкг/л
Цинк (Zn), мкг\л	0.20	0.20	0.20	50 мкг/л
Кадмий (Cd), мкг\л	0.86	3.96	2.49	10 мкг/л
Свинец (Pb), мкг\л	2.00	8.84	2.00	10 мкг/л
Никель (Ni), мкг\л	3.00	27.48	13.88	10 мкг/л
Кобальт (Co), мкг\л	3.47	18.40	10.48	5 мкг/л
Хром (Cr), мкг\л	1.5	3.35	1.50	20 мкг/л
ГХБ, нг/дм³	0.1	7.5	0.1	Отсутствие
α-ГХЦГ (α-HCH), нг/дм³	0.1	5.7	1.1	Отсутствие
γ-ГХЦГ (γ-HCH), нг/дм³	0.1	2.4	0.7	Отсутствие
β-ГХЦГ (β-HCH), нг/дм³	0.1	5.0	0.7	Отсутствие
4,4'-DDE, нг/дм³	0.1	10.5	0.4	Отсутствие
4,4'-DDD, нг/дм³	0.1	3.8	0.1	Отсутствие
4,4'-DDT, нг/дм³	0.1	16.1	1.8	Отсутствие

Σ (DDE, DDD, DDT),	0.1	19.3	3.0	Отсутствие
ΣХОП (Σ Pesticides),	1.2	24.1	6.4	10 нг/дм³

АПАВ* - Анионные поверхностно-активные вещества

Для пестицидов (ХОП) в различных нормативных документах существуют сильно отличающиеся друг от друга значения ПДК. Существует минимальное значение содержания суммы ХОП для рыбохозяйственных водоемов (ПДК -10 нг/л), для отдельных изомеров предполагается их отсутствие в морской среде. Поэтому, следует отметить наличие стабильного фона стойких органических загрязнителей (СОЗ) в виде различных индивидуальных ХОП в водах исследуемых акваторий.

Детергенты (АПАВ)

Концентрации анионных поверхностно-активных веществ, в декабре 2022 года, не превышали ПДК (ПДКр.х. АПАВ – 0.1 мг/л). Средняя концентрация анионных СПАВ за период наблюдений, составила 0.029 мг/л (0,29 ПДК), максимальное значение 0,046 мг/л зафиксировано на станции возле Геленджика (рис. 3.25). В целом, по акватории района исследований, распределение АПАВ было равномерным, можно констатировать, что прибрежные воды не подвержены стойкому загрязнению поверхностно-активными веществами.

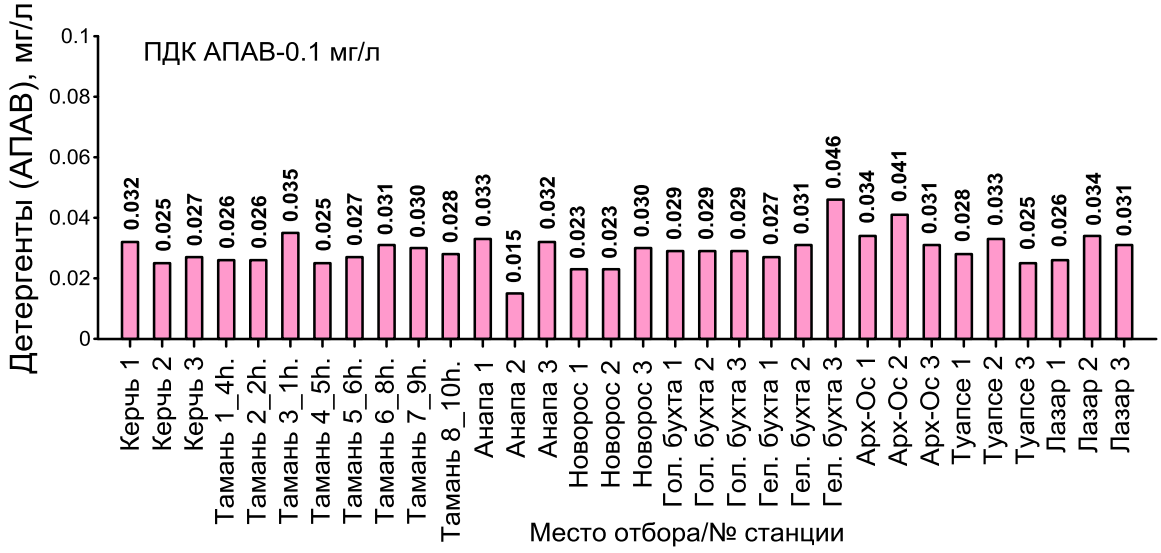


Рисунок 1.1.2.28 – Содержание АПАВ (мг/л) в воде, декабрь 2022 г.

Металлы

Выполненные исследования содержания металлов показали, что за период наблюдений, выше норм ПДК зафиксирован ряд значения для – железа, марганца, меди, никеля и кобальта.

Наибольшее число превышений, в зимний сезон, отмечено для содержания кобальта, для этого металла превышение норм ПДК обнаружено в 30 пробах (рисунок 1.1.2.29). Следует отметить, что повышенный фон содержания кобальта был отмечен во время весенних работ.

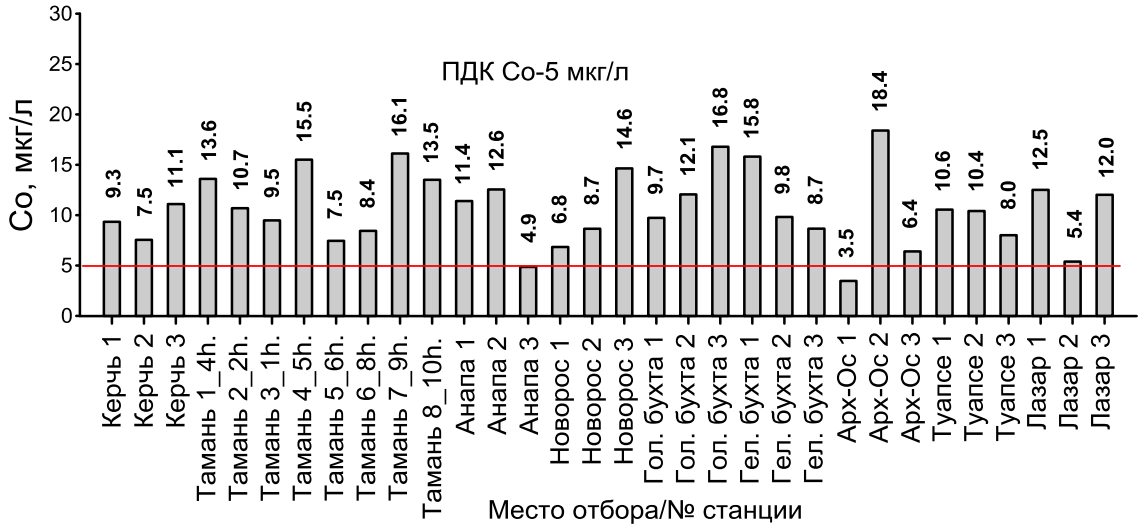


Рисунок 1.1.2.29 – Содержание кобальта (мкг/л) на поверхности, декабрь 2022 г.

Кроме кобальта, за зимний период, превышение ПДК по тяжелым металлам (ТМ) зафиксировано для никеля в 26 пробах, меди в 17 пробах, для марганца – 12 проб (рисунок 1.1.2.30) и железа в двух пробах, величины остальных ТМ находились в концентрациях ниже норм ПДК (табл. 3.8). Пример распределения марганца и железа, представлены на рисунках 1.1.2.30 и 1.1.2.31, где в южной части побережья традиционно наблюдаются повышенные величины содержания этих металлов.

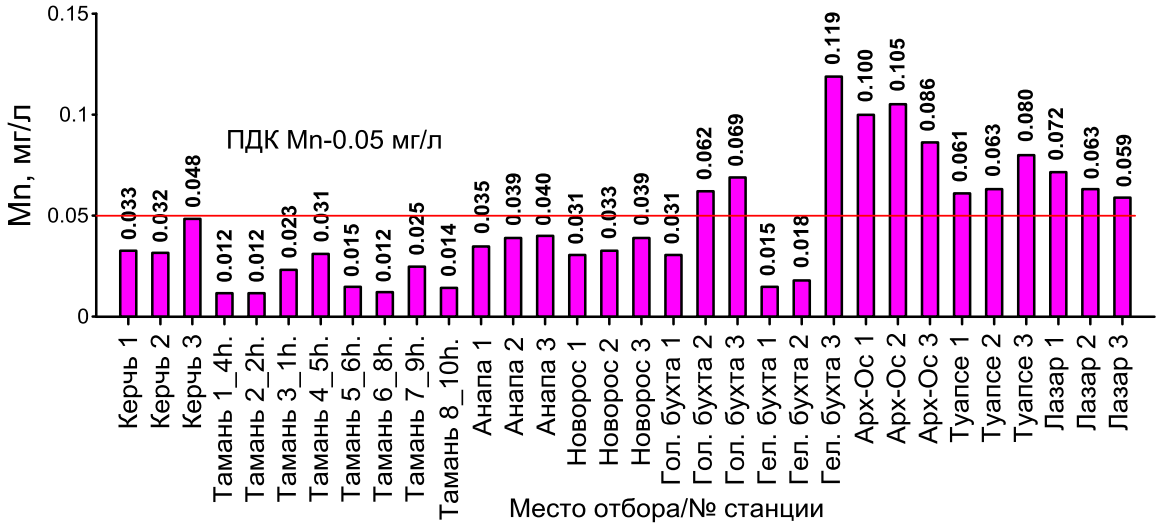


Рисунок 1.1.2.30 Содержание Марганца (мг/л) в воде, декабрь 2022 г.

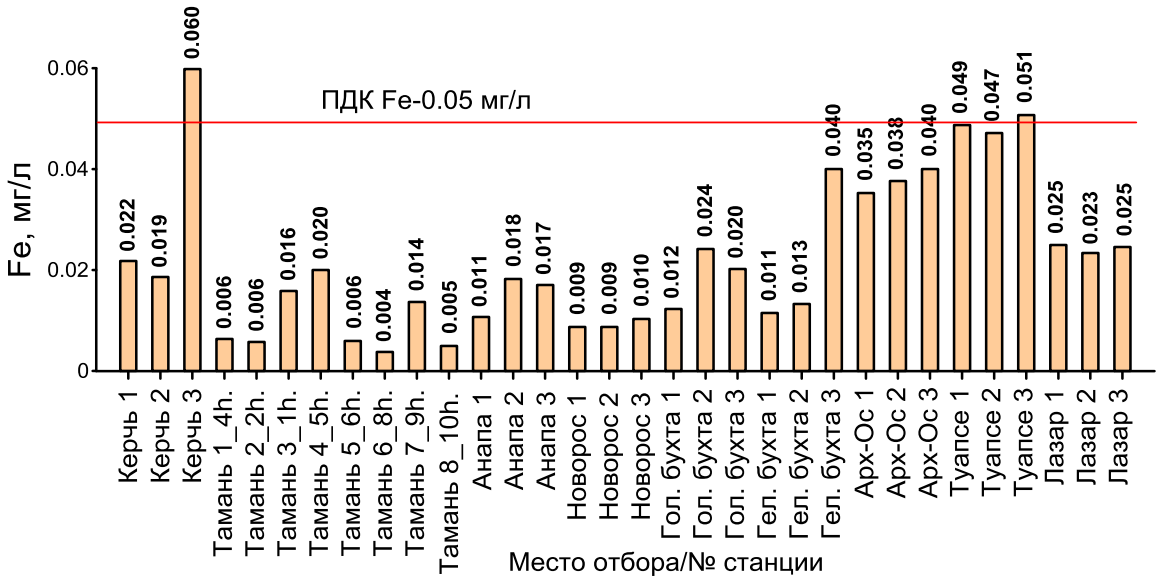


Рисунок 1.1.2.31 – Содержание Железа (мг/л) в воде, декабрь 2022 г.

В целом, для металлов можно отметить повышенные величины на станциях Керчи, Тамань, Геленджика и Туапсе.

На рисунках 2 – 8, в приложении С (зима) дано графическое представление первичного материала по результатам анализа тяжелых металлов (ТМ) в морской воде.

Хлорорганические пестициды (ХОП).

В морской воде определялись следующие ХОП: α-ГХЦГ, β-ГХЦГ, γ-ГХЦГ, гексахлорбензол (ГХБ), группа 4,4'-DDT, 4,4'-DDE, 4,4'-DDD. В декабре анализ выполнен на 32 станциях.

На исследуемой акватории все виды ХОП были обнаружены в концентрациях выше предела обнаружения 0,1 нг/дм³, средние величины оказались ненамного, но выше чем в первые две экспедиции весной и осенью (табл. 3.3, 3.6 и 3.8). Временная изменчивость содержания пестицидов может быть связана с рядом различных факторов, как с количеством осадков и объёмов стоков с суши, так и временем обработки химикатами виноградников и других сельхозугодий.

Для суммы пестицидов (ΣХОП) диапазон изменчивости на исследуемой акватории составил от 1.2 до 24.1 нг/дм³, при средней величине 6.4 нг/дм³. Для распределения ΣХОП на поверхности вдоль побережья характерны повышенные величины на станциях Тамань и в Голубой бухте (рисунок 1.1.2.32).

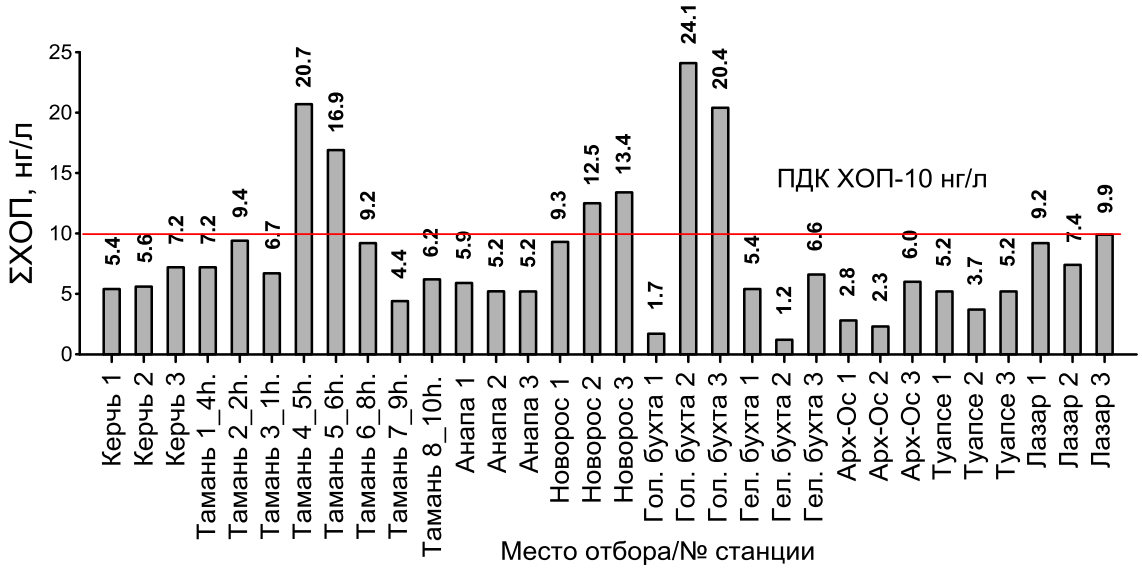


Рисунок 1.1.2.32 – Содержание суммы пестицидов Σ ХОП (нг/дм³), декабрь 2022 г.

В 6 пробах было зафиксировано превышение ПДК (ΣХОП - 10 нг/дм³). Отношение С/ПДК среднего значения составляет 0,64 и 2,4 ПДК для максимального значения. Таким образом, наблюдаются отдельные локальные максимумы содержания, превышающие ПДК. Для отдельных видов ХОП, мы можем констатировать их наличие в морской среде, что является нарушением существующих норм.

Донные отложения

Зимой 2022 года, для оценки экологического состояния донных отложений морской акватории вдоль северо-восточного побережья Черного моря определены тяжелые металлы и пестициды (ХОП).

Уровни содержания загрязняющих веществ исследованы в поверхностном слое (0-5 см) на 11 станциях опробования. В таблице 3.9 приводятся минимальные, максимальные и средние величины, зафиксированные во время выполненных работ в зимний сезон. Зафиксированные превышения ДК выделены в таблице цветом.

Устойчивое превышение ДК по средним величинам на всей акватории исследований, в зимний сезон, не наблюдается. Отдельные превышения в донных отложениях зафиксированы для содержания γ-ГХЦГ (линдан).

Таблица 3.9 Минимальные, максимальные и средние значения содержания загрязняющих веществ в донных отложениях, Керчь-Лазаревское, декабрь 2022 г.

Параметр/зима	Минимум	Максимум	Среднее	ДК*
Железо (Fe), мг\г	5.32	22.11	14.96	-
Марганец (Mn), мг\г	0.22	0.89	0.62	-
Медь(Cu), мкг\г	1.90	13.86	8.74	35

Цинк (Zn), мкг\г	8.10	33.61	25.81	140
Кобальт (Co), мкг\г	1.55	8.09	3.37	20
Кадмий (Cd), мкг\г	0.020	0.161	0.065	0.8
Никель (Ni), мкг\г	6.69	26.87	18.36	35
Хром (Cr), мкг\г	0.15	7.08	0.18	100
Свинец (Pb), мкг\г	0.43	8.07	3.92	85
ГХБ, нг/г	0.1	0.1	0.1	-
α-ГХЦГ (α-HCH), нг/г	0.1	0.1	0.1	-
γ-ГХЦГ (γ-HCH), нг/г	0.1	0.2	0.1	0.05
β-ГХЦГ (β-HCH), нг/г	0.1	0.2	0.1	-
4,4'-DDE, нг/г	0.1	1	0.2	-
4,4'-DDD, нг/г	0.1	1.0	0.1	-
4,4'-DDT, нг/г	0.1	0.8	0.1	-
Σ (DDE, DDD, DDT), нг/г	0.1	1.6	0.8	2.5
ΣХОП (Σ Pesticides), нг/г	0.1	1.6	0.9	-

ДК* - допустимые уровни концентраций (ДК) загрязняющих веществ в донных отложениях водоемов в соответствии с зарубежными нормами (Neue Niederlandische Liste. Altlasten Spektrum 3/95)

Металлы

Выполненные исследования содержания металлов в осадках показали, что за период наблюдений в зимний сезон, превышение норм ДК не зафиксировано (табл. 3.9).

В среднем, содержание тяжелых металлов хорошо согласуется с результатами, полученными в предыдущих сьемках весной и осенью (табл. 3.9, 3.7, 3.5). Пример распределения свинца и меди в донных осадках, в зимний сезон, представлен на рисунках 1.1.2.33-1.1.2.34.

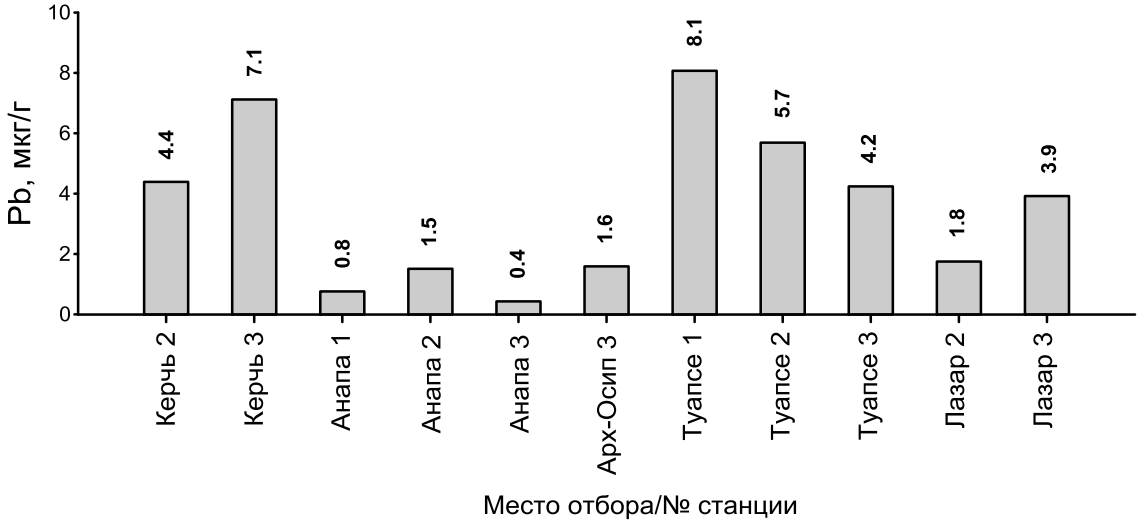


Рисунок 1.1.2.33 – Содержание свинца (мкг/г) в донных отложениях, декабрь 2022 г.

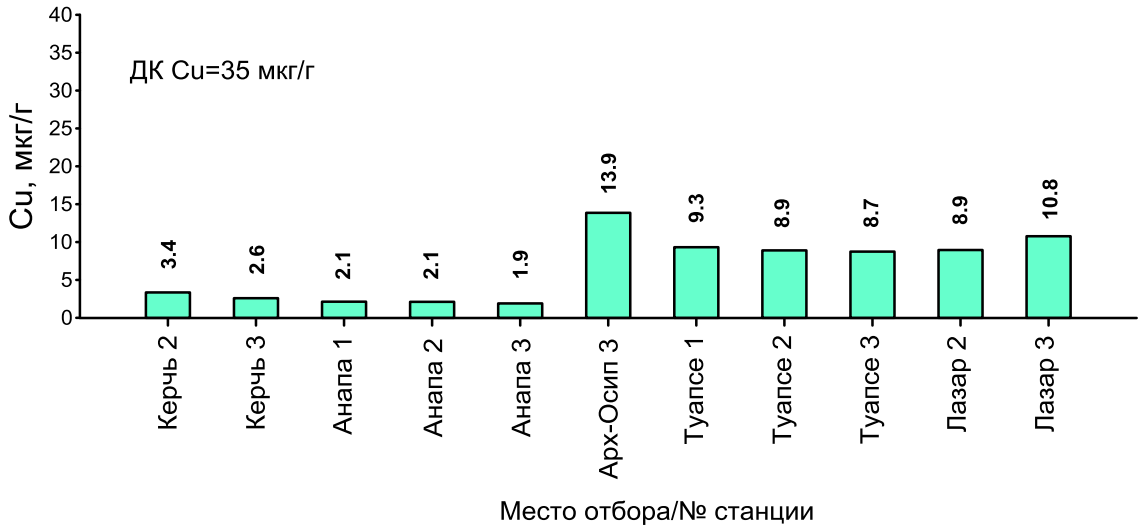


Рисунок 1.1.2.34 – Содержание меди (мкг/г) в донных отложениях, декабрь 2022 г.

В целом, для металлов можно отметить повышенные величины на станциях Керчи и Туапсе. Тем не менее, содержание всех металлов в период наблюдений не превышает существующие нормы ДК и соответствуют средним климатическим величинам для Черного моря.

Хлорорганические пестициды (ХОП).

В осадках определялись следующие ХОП: α-ГХЦГ, β-ГХЦГ, γ-ГХЦГ, гексахлорбензол (ГХБ), группа 4,4'-DDT, 4,4'-DDE, 4,4'-DDD. В декабре анализ выполнен на 11 станциях.

На исследуемой акватории обнаружены все виды ХОП, кроме α-ГХЦГ и ГХБ. Содержание α-ГХЦГ и ГХБ во всех образцах была ниже предела обнаружения < 0.1 нг/г (Табл. 3.9). Таким образом, исследования показали, что в зимний период, на акватории обнаружены пять видов хлорорганических пестицидов из 7 изученных видов ХОП.

Суммарное содержание ДДТ и его метаболитов ДДЕ и ДДД изменялось в диапазоне от 0.1 до 1.6 нг/г, средняя величина составила 0.8 нг/г. Таким образом, в изученной акватории Черного моря максимальное содержание суммы Σ DDE, DDD, DDT не превышало уровень ДК, которое составляет 2.5 нг/г (табл. 3.4), согласно «голландским листам» [Neue Niederlandische Liste. Altlasten Spektrum 3/95].

В зимний сезон, содержание Σ DDE, DDD, DDT в осадках, зафиксировано на более низком уровне, по сравнению с предыдущими экспедициями (рисунок1.1.2.35).

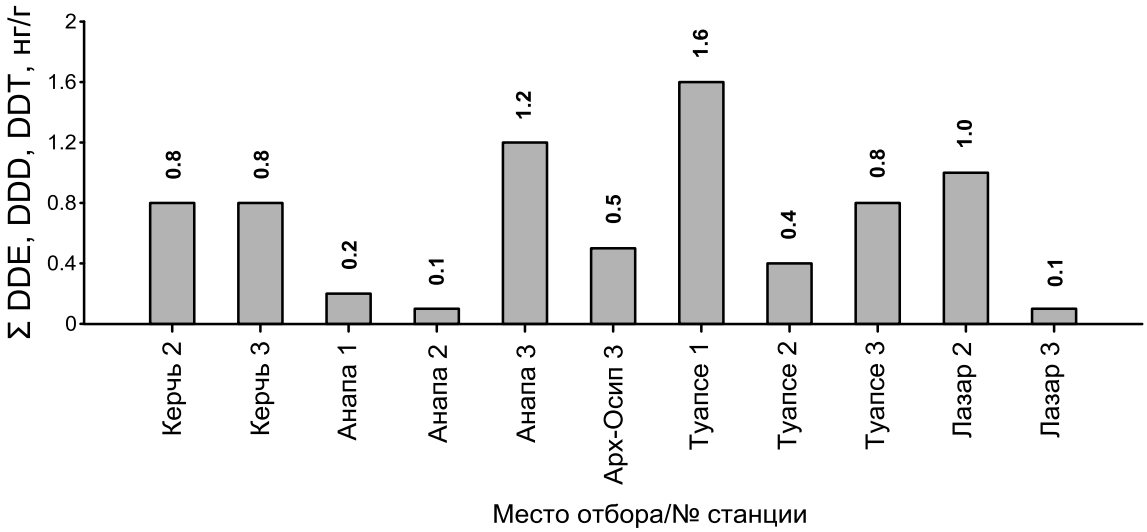


Рисунок 1.1.2.35 – Содержание Σ DDE, DDD, DDT (нг/г) в осадках, декабрь 2022 г.

Согласно «голландским листам», допустимая концентрация (ДК) в осадках для пестицидов существует еще на γ-ГХЦГ (линдан) и этот норматив составляет 0.05 нг/г. Из 11 проб только в 1 пробе был обнаружен линдан в концентрациях *превышающих* эту норму. Для остальных отдельных видов ХОП допустимые концентрации (ДК) отсутствует. Для суммы всех пестицидов (ΣХОП) диапазон изменчивости на исследуемой акватории составил от 0.1 до 1.6 нг/г, при средней величине 0.9 нг/г.

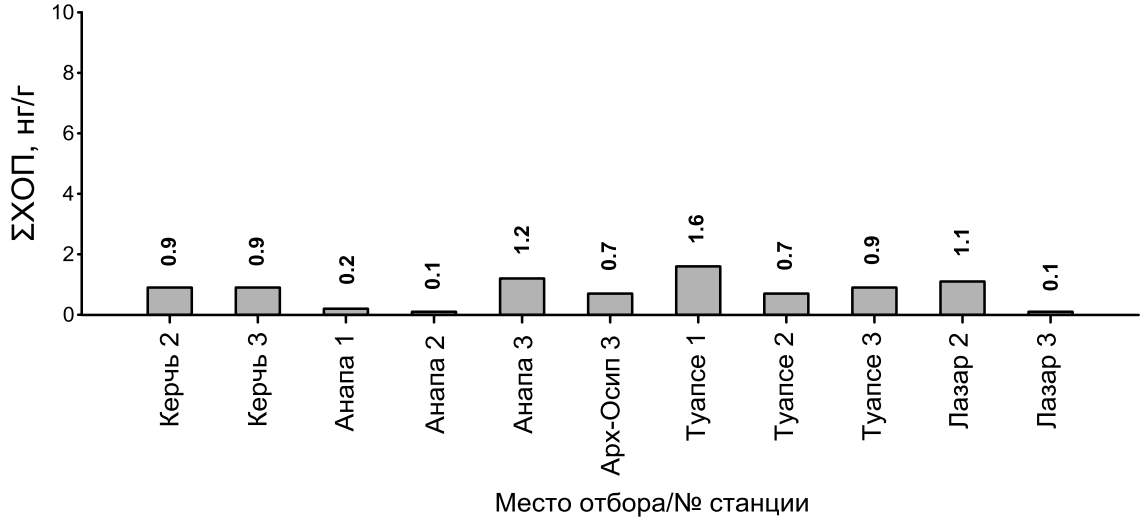


Рисунок 1.1.2.36 – Содержание Σ ХОП (нг/г) в донных отложениях, декабрь 2022 г.

Для распределения ΣХОП в осадках характерны пониженные величины во всех пробах, отобранных вдоль побережья в зимний период. Для остальных видов ХОП в донных отложениях (при отсутствии ДК), мы можем констатировать их стабильное присутствие в морской среде.

Выводы к разделу 1.1.2

В результате трех морских экспедиций, выполненных в различные сезоны года в прибрежном районе северо-восточной части Черного моря, получен значительный массив информации по содержанию и пространственной изменчивости техногенных загрязнений в морской среде кавказского побережья.

Морская вода

В весенний период устойчивое превышение ПДК в воде наблюдалось по среднему содержанию кобальта и индивидуальных изомеров пестицидов (ХОП). Выше нормы зафиксированы отдельные максимальные значения для – марганца и меди.

В осенний период устойчивое превышение ПДК в воде наблюдалось по среднему содержанию ряда индивидуальных пестицидов. Выше нормы зафиксированы максимальные значения для марганца, меди, цинка и никеля.

Зимой (в декабре) превышение ПДК в воде наблюдалось по среднему содержанию меди, никеля, кобальта и индивидуальных изомеров пестицидов. Кроме этих параметров, выше нормы зафиксированы отдельные максимальные значения для марганца и железа.

Во все сезоны года превышение ПДК чаще всего фиксируется для различных изомеров хлорорганических пестицидов (ХОП), поскольку, по нормам, подразумевается их отсутствие в морской среде, чего не наблюдается во время наших исследований. Для тяжелых металлов, наиболее часто превышение допустимых норм в воде характерно для меди, кобальта, марганца и никеля.

Из наиболее загрязненных участков исследованной акватории в первую очередь следует выделить сам район Керченского пролива, а также Новороссийск, Геленджик и Туапсе.

Безусловно, можно констатировать, что прибрежные воды имеют повышенный уровень содержания техногенных загрязнений и соответственно находятся в более напряженной экологической обстановке чем другие акватории Черного моря.

Донные отложения

В весенний период, устойчивое превышение допустимых концентраций (ДК) наблюдается для γ-ГХЦГ (линдан). Отдельные превышения в донных отложениях зафиксированы для содержания ДДТ и его метаболитов ДДД и ДДЕ, т.е. Σ (DDE, DDD, DDT).

Для осеннего периода, устойчивого превышения ДК в осадках на всей акватории исследований, ни по одному из изученных параметров не зафиксировано. Отдельные превышения в донных отложениях зафиксированы для содержания никеля, γ-ГХЦГ и Σ (DDE, DDD, DDT).

Зимой, устойчивого превышения ДК в осадках ни по одному из изученных

техногенных загрязнений не обнаружено. Отдельные превышения в донных отложениях зафиксированы для содержания никеля, γ-ГХЦГ и Σ (DDE, DDD, DDT).

Превышение ПДК, в донных отложениях, чаще всего фиксируется для таких изомеров хлорорганических пестицидов (ХОП) как: γ-ГХЦГ (линдан) и Σ (DDE, DDD, DDT).

Расположение областей наиболее загрязненных донных осадков, собственно совпадает с районами наиболее интенсивного загрязнения прибрежных вод.

Следует отметить наличие стабильного фона стойких органических загрязнителей (СОЗ) в виде различных индивидуальных метаболитов ХОП в водах и донных осадках прибрежной зоны Черного моря. Наиболее тревожен факт высокого содержания пестицидов в донных отложениях.

Полученные результаты работ полностью соответствуют требованиям Плана работ научного исследования.

1.2. Описание особенностей состава алифатических и полициклических ароматических углеводородов

Основную массу (до 95%) нефти и нефтепродуктов составляют углеводороды (УВ). Поэтому современная система экологического мониторинга из-за сложности анализа основана на определении содержания УВ, которые называют нефтяными (НУ) [Коршенко, 2022]. Так, при оценке нефтяного загрязнения природных и сточных вод условно ограничивают их только суммой неполярных и малополярных УВ, не сорбируемых из этих растворов силикагелем. Таким образом, понятие нефтяное загрязнение подменяется понятием углеводородное загрязнение.

Но УВ – вещества, не чуждые природной среде. В Мировом океане ежегодно путем фотосинтеза продуцируется более 12 млн. т УВ, а количество антропогенных УВ, поступающих из всех источников, составляет 1.3 млн. т в год (при возможном интервале от 0.47 до 8.4 млн. т в год) [AMAP, 2007]. Количество нефти, поступающей со дна в океанские воды по последним оценкам достигает 600 тыс. т (46% от суммарного поступления). Поэтому морские экосистемы на протяжении геологических эпох приобрели способность к самоочищению. Не исключено, что они адаптировались не только к определенному объему, но и к определенному составу нефтяных загрязнений, характерному для “сырых” нефтей, связанных с вулканической деятельностью и газо- и нефтепроявлением под дном океанов. Поэтому большое значение может иметь не только количество, но и изменившееся в последнее столетие качество нефтяного загрязнения.

В морских водах в процессе эволюции сложились механизмы ассимиляции УВ и, в

частности, самоочищения морской среды от нефти. Однако к настоящему времени эти механизмы в ряде районов Мирового океана (особенно в шельфовой зоне) нарушаются из-за увеличения антропогенной составляющей.

В настоящем отчете приведены данные по содержанию и составу УВ (алифатических – АУВ и полициклических ароматических ПАУ) во взвеси поверхностных и придонных вод и в донных осадках в мае и в сентябре 2022 г. в прибрежных районах российского сектора Черного моря (рисунок 1.2.1). Цель исследования – определить загрязненность прибрежных районов Черного моря нефтью и нефтепродуктами (далее нефтью).

АУВ и ПАУ относятся к углеводородным классам, которые составляют основную часть большинства сырых нефтей. АУВ кроме того синтезируются фитопланктоном, а основной источник ПАУ – продукты горения топлива и в меньшей степени нефти. Если АУВ легко разлагаются, то ПАУ относятся к стойким органическим загрязняющим веществам, обладающих канцерогенными и мутагенными свойствами [Jafarabadi A. R., 2019; Monitoring, 2011].

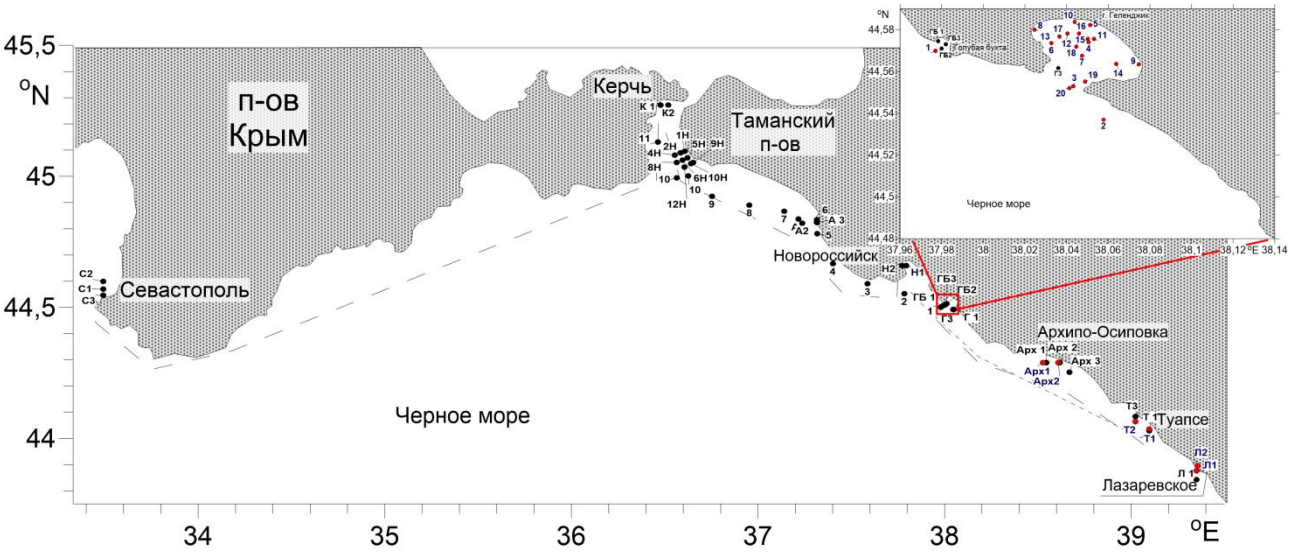


Рисунок 1.2.1 – Схема расположения станций отбора проб по двум маршрутам: от г. Севастополь до пос. Лазаревская (крупный пунктир) и от Голубой бухты до г. Керчь (пунктир мелкий) в мае и сентябре 2022 гг.: красные точки – майские станции; черные точки – сентябрьские станции

Методика исследования

Органические соединения ($C_{орг}$, липиды и УВ) выделяли фильтрацией из воды при 0.2 атм. на предварительно прокаленные при 450°С стекловолокнистые фильтры GF/F

(0.7-1.2 мкм). Поверхностный слой донных осадков отбирали из дночерпателя «Ван-Вина».

Для определения органических соединений УВ экстрагировали из проб взвесей и подсушенных при 50°С проб донных осадков на ультразвуковой ванне «Сапфир». Предварительно из донных осадков для анализа ситованием выделяли фракцию 0.25-0.5 мм. В качестве экстрагента использовали метиленхлорид, квалификации о.с.ч. Липиды (суммарная экстрагируемая фракция) определяли до колоночной хроматографии на силикагеле, а АУВ и ПАУ – после колоночной хроматографии на силикагеле, которые выделяли гексаном [Немировская, 2013]. Концентрацию липидов и АУВ определяли ИК-методом по полосе 2930 $см^{-1}$ на приборе IRAffinity-1 (Shimadzu, Япония), в качестве стандарта использовали смесь: 37.5% изооктана, 37.5% гексадекана, 25% бензола (ГСО 7822-2000). Чувствительность метода – 3 мкг/мл экстракта [Качество…, 2022].

Суммарную концентрацию ПАУ (после колоночной хроматографии на силикагеле) определяли флуоресцентным методом на приборе «Trilogy» (США) относительно стандарта нефтепродукта в гексане (ГСО 7950). Кроме того, содержание и состав ПАУ определяли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии на хроматографе «LC-20 Prominence» Shimadzu, Япония; колонка – «Envirosep PP», при температуре термостата 40оС в градиентном режиме (от 50% объемной доли ацетонитрила в воде до 90%); скорость потока элюента – 1 см3/мин. При этом использовали флуоресцентный детектор «RF-20A» с программируемыми длинами волн поглощения и возбуждения. Расчет проводили с помощью программного обеспечения «LC Solution». Калибровали прибор при помощи индивидуальных ПАУ и их смесей производства фирмы «Supelco». В результате были идентифицированы приоритетные полиарены, рекомендованные при изучении загрязненности морских объектов EPA (Environmental Pollution Agency) [**Monitoring…,** 2011]: Н–нафталин, МеН – 1-метилнафталин, 2-МеН – 2-метилнафталин, АСНФ – аценафтен, Флуор – флуорен, Ф – фенантрен, АН – антрацен, ФЛ – флуорантен, П – пирен, БаН – бенз(а)антрацен, ХР – хризен, БеП – бенз(е)пирен, ББФЛ – бенз(b)флуорантен, БкФЛ – бенз(k)флуорантен, БП – бенз(а)пирен, ДБahA – дибенз(a,h)антрацен, БПЛ – бенз(g,h,i)перилен, ИНД – индено[1,2,3-c,d]пирен.

Для определения содержания и состава алканов из фракции АУВ использовали газовый хроматограф Кристалл-Люкс 4000-М, Россия, оснащенный пламенно-ионизационным детектором, с капиллярной колонкой 30 м ×0.22 мм, “Supelco”, с фазой: 5% фенила и 95% метилполиксилана, при программировании температуры от 60 до 300°С, со скоростью 8°/мин, газ-носитель–гелий (скорость прохождения газа 1.5 мл/мин). Для калибровки прибора и определения времени выхода, идентифицируемых алканов,

использовали смесь калибровочных стандартов н-С10–С40, “Supelco”, а в качестве внутреннего стандарта – сквалан, “Sigma Aldrich”. Расчет проводили с помощью программного обеспечения Netchrom V2.1.

Данные по содержанию взвеси и Сорг во взвеси взяты из отчета Б.В. Коновалова.

Органический углерод (Сорг) в донных осадках определяли методом сжигания на приборе TOC-L (Shimadzu, Japan). Чувствительность метода 6 μг углерода, точность 3–6%.

Состав взвеси определяли на сканирующем электронном микроскопе VEGA-3sem, фирмы TESCAN, Чехия. Для определения доли АУВ в составе Сорг использовали коэффициент 0.86.

Поверхностные и придонные воды (май 2022 г.)

Результаты анализа органических соединений во взвеси поверхностных вод показали, что в акватории Геленджикской бухты концентрации липидов и АУВ в среднем соответственно составили 34 и 20 мкг/л, а ПАУ – 45 нг/л. Более высокие величины АУВ установлены в северной части Геленджикской бухты и при подходе к Голубой бухте (рисунок 1.2.2, таблица 1.2.1).

Картина распределения АУВ совпадает с распределением взвеси, Сорг во взвеси и хл а. При этом наблюдались связи в распределении взвеси, Сорг во взвеси и хл а (r=0.64–0.67), а также между АУВ и ПАУ (r=0.76). Последнее может указывать на трансформацию этих углеводородных классов, имеющих разные источники эмиссии.

Таблица 1.2.1. Концентрация органических соединений во взвеси в мае 2022 г.

Станция	Горизонт	Липиды	АУВ	Хл а	% АУВ	ПАУ,	Взвесь*	$С_{орг}$*
		мкг/л			от лип.	нг/л	мг/л	
1	0	48	32	0.05	67	87	1,19	0,18
	дно	23	22	0.08	94	46	1,21	0,21
2	0	24	21	0.05	88	69	1,41	0,18
	дно	23	18	0.07	78	69	1,19	0,19
3	0	25	21	0.05	86	23	0,84	0,17
	дно	20	15	0.14	75	28	1,13	0,24
4	0	27	21	0.07	78	75	1,21	0,21
	дно	25	20	0.05	80	25	0,40	0,14
5	0	32	28	0.11	87	97	1,08	0,19
	дно	35	26	-	74	78	-	-
6	0	23	19	0.05	83	11	0,46	0,13
7	0	22	18	0.07	82	<2	0,90	0,17
8	0	27	18	0.09	65	<2	1,07	0,20
9	0	28	14	0.11	49	<2	0,72	0,20
10	0	36	19	0.07	53	<2	0,68	0,16
11	0	68	36	0.06	53	141	0,57	0,16
	дно	23	14	0.05	59	<2	0,46	0,13
12	0	35	17	0.06	48	87	0,44	0,14
13	0	33	8	0.05	24	<2	0,82	0,15

	дно	45	26	0.04	56	41	0,88	0,17
14	0	57	10	0.06	18	4	0,82	0,15
15	0	25	14	0.04	57	46	0,69	0,14
16	0	28	15	0.05	55	13	0,72	0,17
17	0	22	14	0.05	65	10	1,04	0,16
18	0	26	12	0.06	46	11	0,56	0,14
19	0	62	24	0.04	39	42	0,93	0,16
20	0	24	20	0.04	83	78	0,80	0,14
Средняя	0	34	20	0.06	63	54	0,85	0,16
Средняя	придонный слой	28	22	0.07	83	48	0,88	0,18
Туапсе 1	0	46	24	0.16	51	111	1,89	0,30
Туапсе 2	0	38	17	0.11	46	47	1,74	0,26
Средняя	0	44	20	0.14	48	74	1,82	0,28
Лазаревское 1	0	34	29	0.05	86	133	1,18	0,21
Лазаревское 2	0	24	19	0.03	79	83	1,88	0,24
Архипо-Осип. 1	0	35	28	0.04	81	83	2,82	0,33
Архипо-Осип. 2	0	21	17	0.04	81	87	2,25	0,32
Средняя	0	28	22	0.04	81	85	2,54	0,32

*Данные Б.В.Коновалова

В придонном горизонте концентрации исследуемых соединений практически совпали с поверхностными, и их средние величины для пяти проб составили: липиды – 25 мкг/л, АУВ – 19 мкгл, в большей степени изменилась (уменьшилась) концентрация ПАУ (в среднем 39 нг/л), так как основной источник ПАУ – атмосфера.

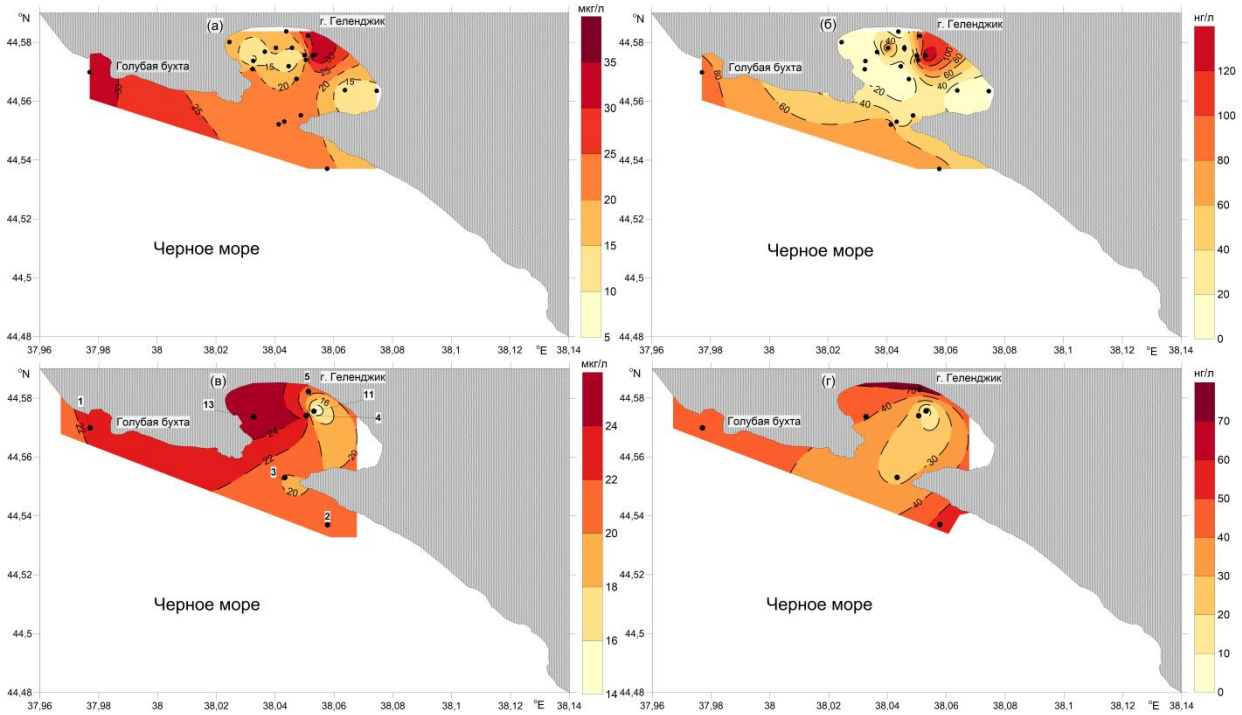


Рис. 1.2.2. Распределение АУВ (а, в) и ПАУ (б, г) в поверхностных (а, б) и придонных водах (в, г) в мае 2022 г.

Состав алканов поверхностного слоя в мае 2022 г. в низкомолекулярной области имел более плавное распределение гомологов (рис. 3). Поэтому отношение L/H во

многих пробах <1 (табл. 1.2.2). Небольшой рост гомологов н-С14 и н-С20 может указывать на микробиальную трансформацию алканов.

Таблица 1.2.2. Распределение маркеров в составе алканов во взвеси.

Станция	Горизонт	АУВ	Алканы	C_{17}/C_{25}	L/H*	Paq	$i\text{-}C_{19}/i\text{-}C_{20}$	CPI	Ki
		мкг/л							
1	дно	29	0.8	0.11	0.31	0.39	0.25	1.92	0.50
2	0	28	0.3	0.09	0.22	0.31	0.31	1.32	0.43
3	0	28	0.8	0.26	0.26	0.34	0.29	1.19	0.44
3	дно	26	0.4	0.53	0.87	0.48	0.79	1.11	0.83
4	0	28	2.5	0.04	0.21	0.32	0.40	1.98	0.55
4	дно	32	0.7	1.05	1.37	0.52	0.79	1.38	0.52
5	дно	34	0.8	0.46	0.84	0.39	0.79	1.23	0.82
8	0	24	0.4	0.51	1.09	0.49	0.40	1.27	0.65
10	0	25	0.3	0.46	1.01	0.47	0.73	1.30	0.79
13	0	11	1.3	0.62	1.13	0.51	0.62	1.14	0.35
13	дно	34	0.4	1.19	1.47	0.43	0.27	1.13	0.60
14	0	14	0.2	0.92	1.10	0.44	0.72	1.22	0.55
15	0	19	1.0	0.26	0.63	0.41	0.47	1.43	0.43
16	0	21	1.4	0.24	0.66	0.47	0.45	1.24	0.13
19	0	32	0.8	0.30	0.86	0.60	0.81	1.20	0.76
Туапсе 1	0	31	2.5	0.03	0.24	0.39	0.20	1.10	0.59
Лазаревское 2	0	29	1.3	0.07	0.29	0.37	0.30	1.36	0.64
Архипо-Осип 2	0	24	0.4	0.05	0.25	0.43	0.31	1.07	0.53

*(L/H – $\sum(C_{10\text{-}24})/\sum(C_{25\text{-}35})$; Paq – $(C_{23}+C_{25})/(C_{23}+C_{25}+C_{29}+C_{31})$; CPI – $\sum$(нечет)/$\sum$(чет); K_i – $(i\text{-}C_{19}+C_{20})/(C_{17}+C_{18})$

В процессе седиментации изменялся состав алканов (рис. 1.2.3), так как в поверхностных водах количество низкомолекулярных алканов было меньше, чем в придонных водах. Отношение L/H, указывающее на автохтонное образование АУВ, которое возрастало в районе ст. 4 в центральной части Геленджикской бухты, а также в западной части бухты на станциях 8, 10, 13 (табл. 1.2.2).

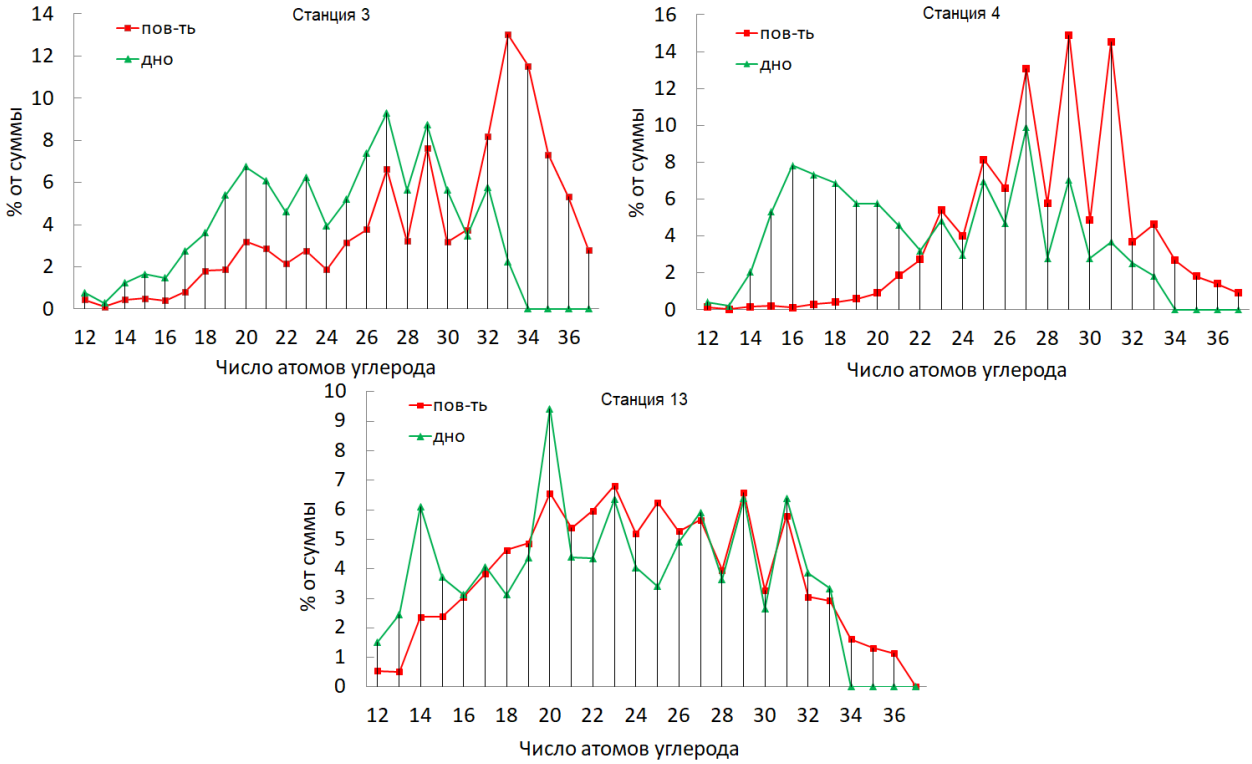


Рис. 1.2.3. Распределение гомологов в составе алканов в поверхностных и придонных водах на отдельных станциях.

Необходимо отметить, что в акватории Архипо-Осиповки и Туапсе концентрации АУВ практически не отличались от их величин в Геленджикской бухте (табл. 1.2.1). Только содержание ПАУ, величины, которых изменялись в диапазоне 83 – 133 нг/л, в среднем увеличилось почти в 2 раза. Изменился здесь также состав алканов, который характеризовался плавным распределением гомологов присущим выверенным нефтяным АУВ. Поэтому значения CPI были минимальными, что также характерно для нефтяных УВ.

В составе ПАУ во взвеси поверхностных вод доминируют фенантрен, флуорантен и пирен (рис. 1.2.5). В процессах горения в большей степени образуется пирен, но из-за его меньшей устойчивости в природных объектах обычно преобладает флуорантен. Низкие величины отношения ФЛТ/ПР присуще свежему загрязнению, так как в пробах трансформированных ПАУ концентрации флуорантена возрастают.

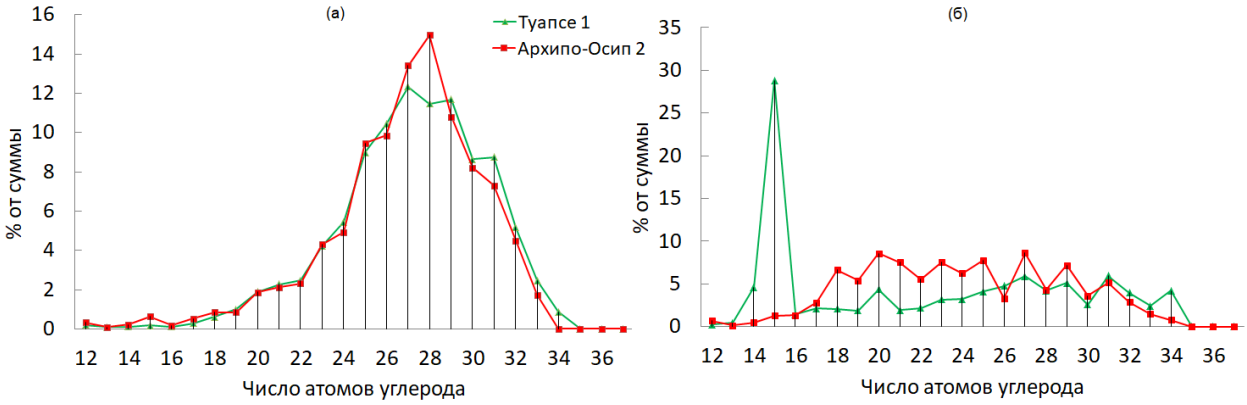


Рис. 1.2.4. Распределение гомологов в составе алканов в поверхностных водах (а) и в поверхностном слое донных осадков (б) в акватории Туапсе и Архипо-Осиповки (зеленый Туапсе 1, красный –Архипо-Осиповка-2).

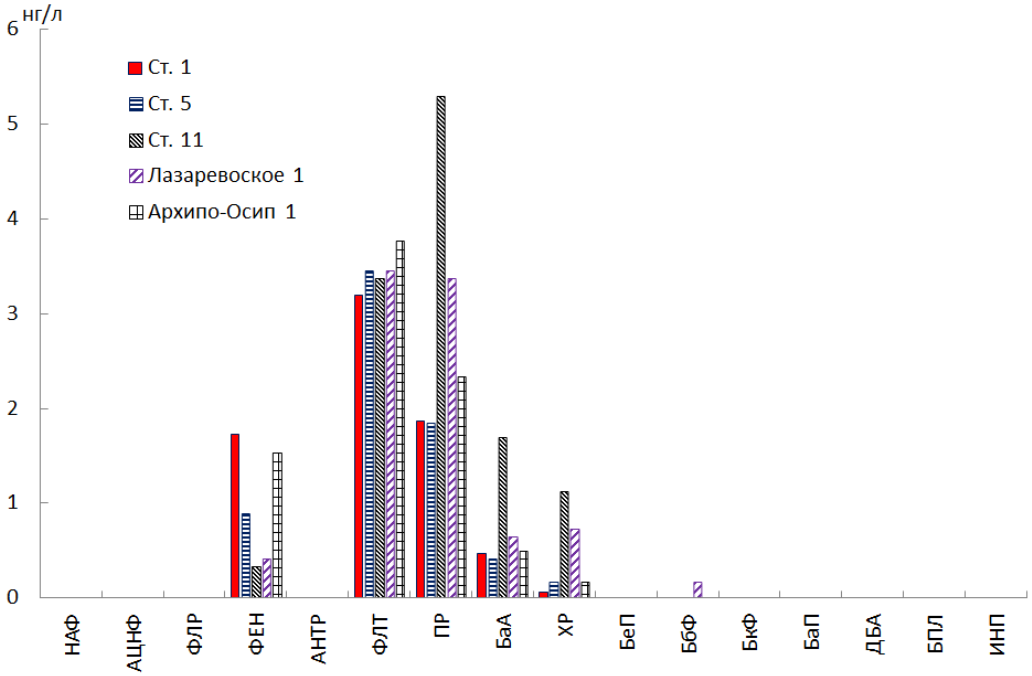


Рис. 1.2.5. Состав ПАУ во взвеси поверхностных вод на отдельных станциях в мае 2022 г..

Отношение ФЛТ/ПР имеет максимальную величину на ст. 2 – 2.04, т.е. здесь полиарены наиболее трансформированы, а минимальную –на ст. 11 (0.64), где влияние на состав ПАУ пирогенных процессов повышено. Низкие величины отношения Σ(2-3кол.)/Σ(5-6 кол.) – 0.03–0.05 также указывают на их пирогенный источник.

Донные осадки (май, 2022 г.)

В акватории Геленджикской и Голубой бухтах осадки имели разный гранулометрический состав и концентрации УВ изменялись в большом диапазоне: для АУВ – 28–661 мкг/г, для ПАУ – <2–1014 нг/г (табл. 1.2.3). Примечательно, что максимальные концентрации, как АУВ, так и ПАУ установлены в песчанистом осадке ст. Туапсе-1, при содержании Сорг всего 0.27%.

Влажность осадков зависит от их гранулометричесмкого состава, поэтому между содержанием Сорг и влажностью осадков установлена зависимости: для песчанистых – r=0,75, для илистых – r=0,91. При этом в илистых отложениях наблюдалась корреляция в распределении АУВ и Сорг (r =0.87) и АУВ и влажности (r =0.65), а в песчанистых осадках, наиболее приближенных к берегу эти зависимости отсутствовали (значения r соответственно составили 0.02 и -0.41). Если учесть, что фоновое содержание АУВ в песчанистых осадках 10 мкг/г, а в илистых – 50 мкг/г, то в среднем их фон был превышен в 12 раз в песчанистых (в пробе Туапсе-1 в 66 раз) и более, чем в 2 раза в илистых.

Таблица 1.2.3. Результаты анализа поверхностного слоя донных осадков, отобранных в мае 2022 г.

Станция	АУВ, мкг/г	Влажность, %	ПАУ, нг/г	$C_{орг}$, %	АУВ, % от С	Примечание
1	92	40	167	1.05	0.75	Много ракушек
2	36	33	33	0.42	0.73	
3	28	22	21	0.43	0.56	
4	32	28	<2	0.20	1.36	
5	38	31	11	0.19	1.74	
8	46	41	72	0.68	0.58	
9	51	60	321	0.17	2.60	
10	28	30	45	0.25	0.96	
11	63	29	50	0.26	2.07	
12	43	29	44	0.30	1.23	
13	135	30	502	0.21	5.52	
14	462	83	35	3.00	1.32	Обводненная проба
15	149	36	45	0.73	1.76	
16	41	44	200	0.4	0.88	
17	31	57	82	0.29	0.91	
18	52	45	12	0.73	0.62	
Архипо 1	10	21	91	0.17	0.50	
Архипо 2	16	21	<2	0.06	2.27	
Туапсе 1	661	15	1014	0.27	21.05	много мелких камней

Один из признаков нефтяного загрязнения – повышенная величина АУВ в составе Сорг. Обычно в донных осадках содержание АУВ в составе Сорг были меньше 0.5%, а ПАУ <0.002%. Только в акваториях с антропогенными нефтяными поступлениями, грязевым вулканизмом, эндогенной миграцией концентрации АУВ повышались и превышали 1% в составе Сорг [Немировская, 2013]. Полученные данные показали (табл. 1.2.3), что во многих осадках доля АУВ превышала 1%, а максимальная величина (21,05%) установлена в осадке Туапсе-1. Поэтому рост содержания АУВ относительно фоновой концентрации как в пересчете на сухой осадок, так и в составе Сорг, скорее всего, обусловлены загрязнением.

Тем не менее, между распределением АУВ и ПАУ связь наблюдалась r(АУВ–ПАУ)=0.58, т.е. углеводороды уже в достаточной степени трансформированы (рис. 1.2.6). Поэтому в составе алканов осадков доминируют в основном высокомолекулярные гомологи. В низкомолекулярной области распределение алканов довольно плавное (рис. 1.2.7а) и отношение L/H в большинстве проб в Геленджикской бухте <1. Исключение наблюдалось в осадке на ст. 13 (рис. 1.2.7б), где при повышенной концентрации в песчанистом осадке (135 мкг/г) в составе алканов незначительно доминировали низкомолекулярные гомологи –L/H =1.02 (табл. 1.2.4). В этой пробе минимально отношение пристан/фитан, значение CPI <1, все это может указывать на включение в их состав нефтяных УВ, так как низкотемпературная часть хроматограмм иллюстрирует роль испарения и биодеградации нефтяных алканов в процессе седиментации.

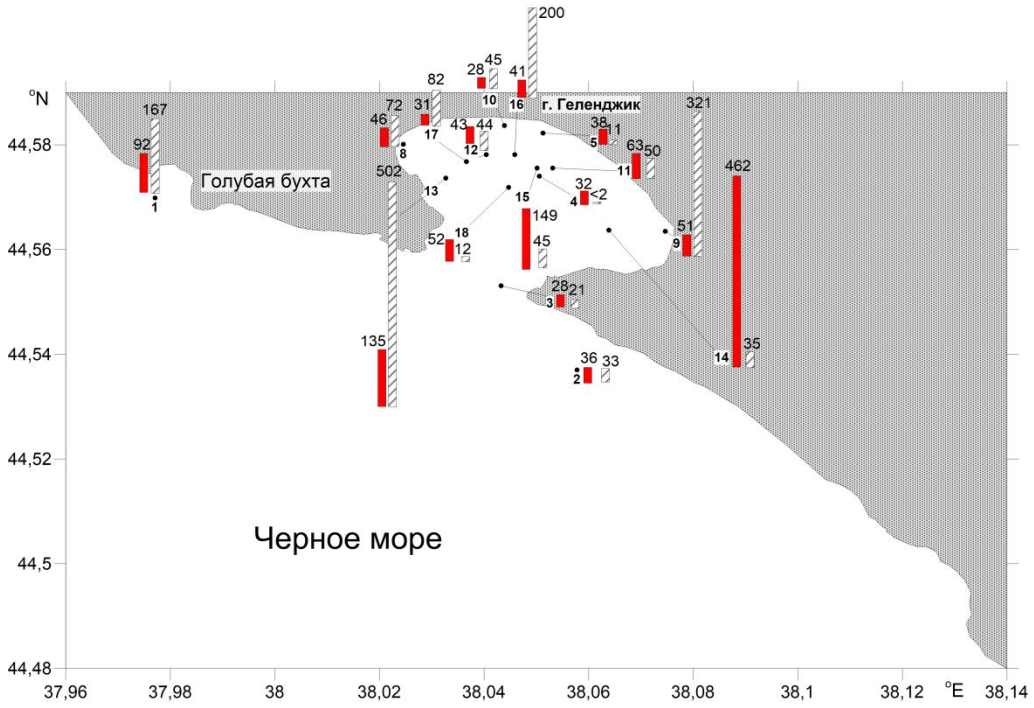


Рис. 1.2.6. Концентрации АУВ (мкг/г, над красными столбцами) и ПАУ (нг/г, над заштрихованными столбцами) в поверхностном слое донных осадков в мае 2022 г. Возле точек – номера станций.

Таблица 1.2.4. Распределение маркеров в составе алканов поверхностного слоя донных осадков в мае 2022 г.

Станция	АУВ	Алканы	C_{17}/C_{25}	L/H*	Paq	i-C_{19}/i-C_{20}	CPI	Ki
	мкг/г							
1	92	0.2	0.35	0.78	0.61	0.32	1.56	0.68
2	36	0.1	0.50	0.57	0.27	0.38	2.14	0.53
8	46	0.1	0.31	0.47	0.30	0.34	2.31	0.54
13	135	0.2	0.86	1.02	0.41	0.19	0.95	0.43
14	462	0.4	0.51	0.57	0.27	0.21	1.81	0.28

15	149	0.1	1.27	0.53	0.23	0.30	1.71	0.30
Архипо-Осип. 2	16	0.1	0.37	1.21	0.55	0.20	1.24	0.46
Туапсе 1	661	0.2	0.52	1.31	0.40	1.78	1.63	0.93

**(*L/H – $\sum(C_{10\text{-}24})/\sum(C_{25\text{-}35})$; Paq – $(C_{23}+C_{25})/(C_{23}+C_{25}+C_{29}+C_{31})$; CPI – ∑(нечет)/∑(чет); K_i – $(i\text{-}C_{19}+C_{20})/(C_{17}+C_{18})$

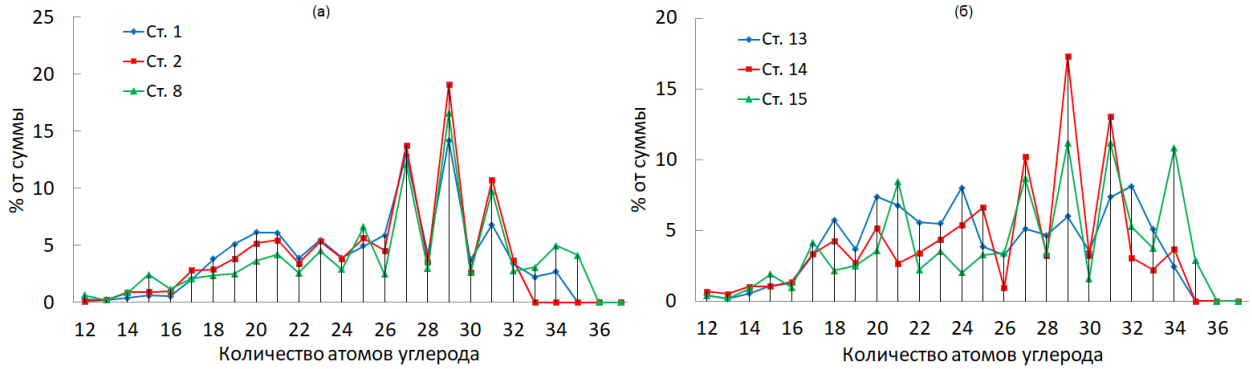


Рис. 1.2.7. Распределение гомологов в составе алканов в поверхностном слое донных осадков на отдельных станциях.

Песчанистые осадки в районе Архипо-Осиповски отличались довольно низким содержанием АУВ (10-16 мкг/г), то есть практически фоновыми величинами. Напротив концентрации ПАУ изменялись от аналитического нуля до 91 нг/г (табл. 1.2.5). В пробе Туапсе-1 преобладают низкомолекулярные соединения и практически 30% составляет алкан н-С15 (рис. 1.2.4б), характеризующий планктоногенное ОВ. Кроме того, ранее было отмечено, что нефтяные УВ способствуют интенсификации биохимических процессов [Немировская, 2013]. Возможно, с этим связано повышение доли автохтонных АУВ в осадках, где фиксируется нефтяной состав алканов (рис. 1.2.7).

Состав ПАУ в донных осадках исследованной акватории был более разнообразным по сравнению с взвесью (рис. 1.2.5, 1.2.8). Последнее обусловлено более высокими их концентрациями в осадках. Если во взвеси низкомолекулярные ПАУ не обнаружены, а их основу составляла сумма флуорантена и пирена, то в осадке на ст.1 доля 2-3-х кольчатых полиаренов достигала 73%, при этом повышено содержание нафталинов, маркирующие нефтяные УВ.

Несмотря на широкий диапазон концентраций суммы ПАУ, корреляционный анализ показал наличие тесных связей между индивидуальными полиаренами. Минимальную степень связи с сумой ПАУ демонстрируют нафталин и его гомологи – наиболее легкие, летучие и растворимые из идентифицированных УВ. Обнаружение высокомолекулярных ПАУ свидетельствует о включение в донные осадки продукты пиролиза органических соединений.

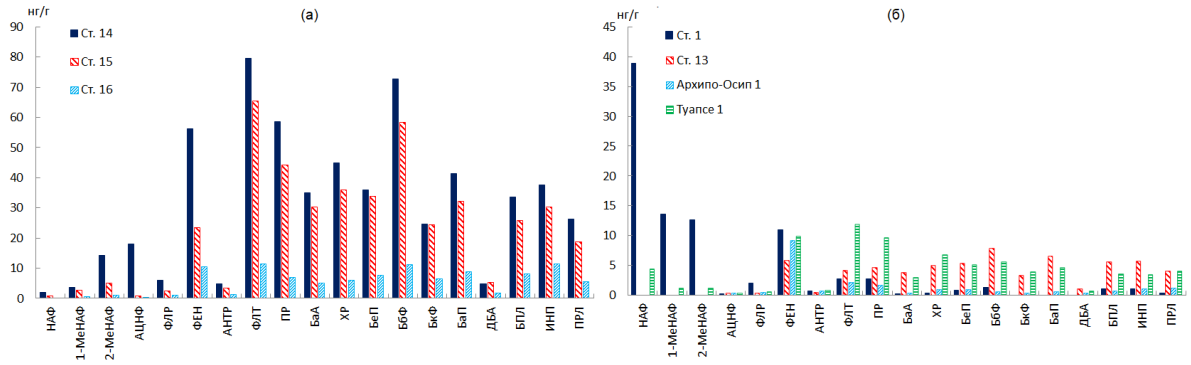


Рис. 1.2.8. Состав ПАУ в донных осадках на отдельных станциях.

Основу взвеси на прибрежных станциях составляли обломки минеральных частиц, кокколитофориды, диатомовые водоросли, а также сферы сгорания (рис. 1.2.9).

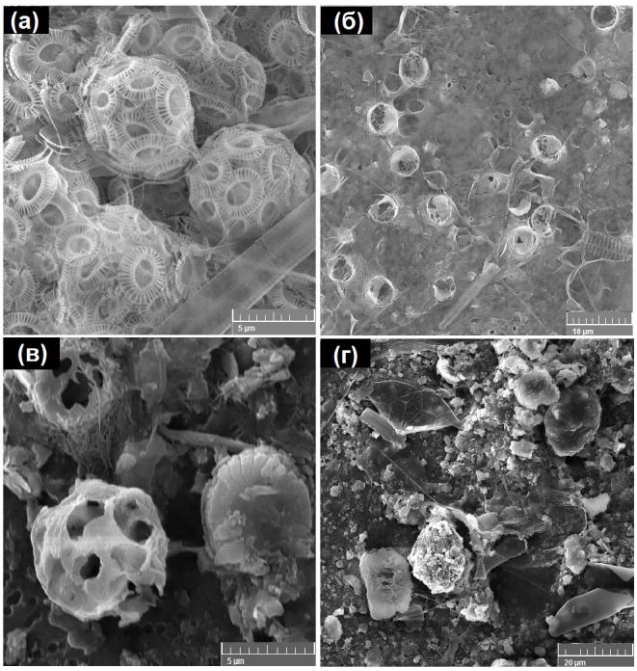


Рис. 1.2.9. Состав взвеси поверхностных вод Геленджикской (а, б) и Голубой (в, г) бухт: (а) – кокколитофориды; (б) – сферы сгорания; (в) – диатомовые, споры и минеральные частицы (общий вид фильтра); (г) – минеральные частицы и диатомовые водоросли (общий вид фильтра с прибрежной станции).

Поверхностные воды (сентябрь)

Средние концентрации органических соединений во взвеси поверхностных вод в прибрежных районах Черного моря составили: липиды – 74 мкг/л, АУВ – 38 мкг/л (что меньше ПДК, для нефтяных УВ – 50 мкг/л), ПАУ – 181 нг/л (рис. 1.2.10, табл. 1.2.5). Их содержание изменилось по сравнению с маем 2022 г. В сентябре произошло увеличение средних концентраций АУВ (38 мкг/л) в 1,5 раза и ПАУ (181 нг/л) – почти в 3,5 раза. При этом концентрации взвеси снизились в 2 раза. Довольно низкое содержание АУВ

установлено в акватории Севастополя – 34 мкг/л, Архопо-Осиповка – 22 мкг/л, Туапсе – 36 мкг/л, а максимальное в Геленджикской бухте – 50 мкг/л.

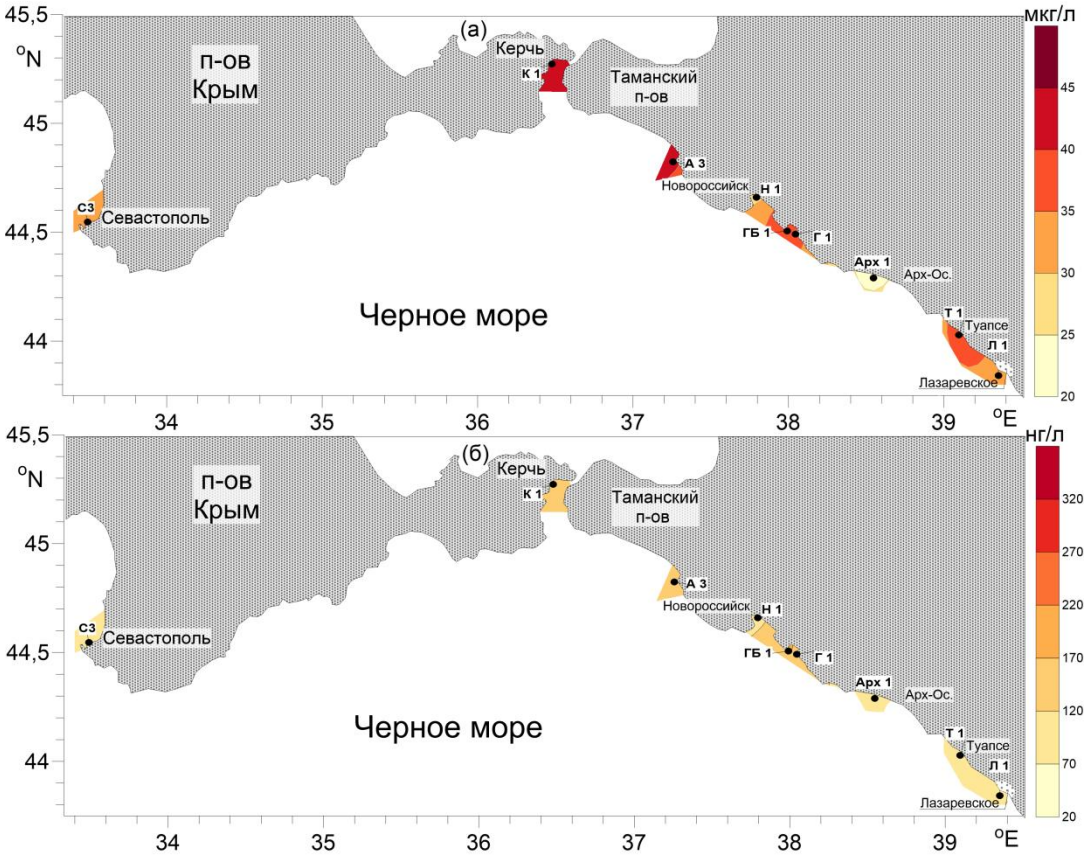


Рис. 1.2.10. Распределение в поверхностных водах АУВ (а) и ПАУ (б) в сентябре 2022 г.

Таблица 1.2.5. Концентрация органических соединений во взвеси в сентябре 2022 г.

Станция	Сокращение	Липиды	АУВ	Хл а	% АУВ	ПАУ,	Взвесь*	$C_{орг}$*
		мкг/л			от лип.	нг/л	мг/л	
Севастополь	С3	76	34	2.31	45	88	1.02	0.13
Керчь	К1	129	40	1.23	31	122	0.6	0.18
Анапа 3	А3	147	41	2.00	28	151	1.14	0.13
Новороссийск	Н1	77	24	0.65	31	72	0.49	0.07
Архипо-	Арх1	63	22	0.71	34	70	0.49	0.09
Туапсе	Т1	93	36	1.72	39	95	1.91	0.12
Лазаревское	Л1	92	34	1.00	37	69	1.77	0.13
Голубая бухта	ГБ1	67	40	0.67	59	183	0.48	0.08
Геленджикская	Г1	84	51	0.50	61	417	0.79	0.09
Разрез Керчь	1	71	34	0.53	48	183	0.24	0.06
-//-	2	107	51	0.56	48	369	0.34	0.07
-//-	3	81	53	0.67	66	104	0.24	0.07
-//-	4	118	54	0.86	46	292	0.47	0.08
-//-	5	80	52	0.59	64	208	0.17	0.06
-//-	6	99	57	0.65	58	221	0.33	0.07
-//-	7	38	20	0.55	52	188	0.24	0.06
-//-	8	85	50	0.55	58	179	0.38	0.07

-//-	9	38	24	0.49	62	183	0.17	0.05
-//-	10	31	21	0.49	70	221	0.33	0.06
-//-	11	38	22	0.77	57	142	0.47	0.08
Средняя разрез	-	72	40	0.61	57	208	0.31	0.07
Полигон	12Н	80	46	0.52	61	<2	0.51	0.08
-//-	1Н	62	39	1.28	63	213	0.72	0.08
-//-	2Н	50	38	0.98	76	123	0.46	0.08
-//-	4Н	55	36	0.63	66	64	0.41	0.07
-//-	5Н	70	49	1.96	67	<2	0.86	0.12
-//-	6Н	61	42	1.18	69	357	0.57	0.09
-//-	8Н	38	21	1.01	56	<2	0.41	0.08
-//-	9Н	59	28	1.71	48	349	0.79	0.1
-//-	10Н	66	35	1.37	53	409	0.67	0.1
-//-	10	59	39	0.88	66	353	0.24	0.07
Средняя	-	60	37	1.15	62	187	0.56	0.09

*Данные Б.В.Коновалова

На разрезе Керчь средние концентрации липидов, АУВ и ПАУ составили соответственно 72 мкг/л, 40 мкг/л, 208 нг/л (рис. 1.2.11, табл. 1.2.5). Максимальная концентрация АУВ установлена на ст. 6 – 57 мкг/л, в непосредственной близости от берега.. Распределение АУВ коррелирует с концентрацией липидов: r=0.93, n=11, p <0.01. Так же корреляция наблюдалась в распределении взвеси и Сорг (r=0.87), Сорг и хл а (r=0.85), взвесь и хл а (r=0.67). Хуже связи между распределением Сорг и АУВ (r=0.42), Сорг и липиды (r=0.51), УВ и ПАУ (r=0.30). Последнее указывает на различную природу УВ, так как АУВ (основные источники – фитопланктон и нефтяное загрязнение) и ПАУ (продукты сгорания топлива и в меньшей степени, нефтяное загрязнение).

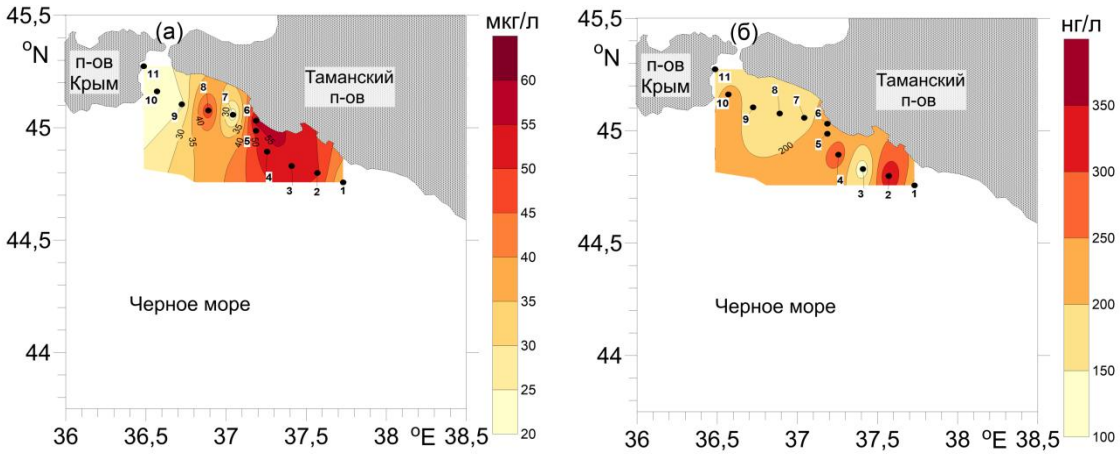


Рис. 1.2.11. Распределение АУВ (а) и ПАУ (б) на полигоне в акватории Таманского п-ва в сентябре 2022 г..

Результаты анализа на полигоне в акватории Таманского п-ова показали, что АУВ (49 мкг/л) близка к ПДК для нефтяных углеводородов – 50 мкг/л, хл а (1.96), Сорг (0.12 мг/л) и минеральной фракции взвеси (0.86 мг/л) расположены в восточной части вблизи

берега на станции 5Н (рис. 1.2.12, табл. 1.2.5). Возможно, это вызвано высокой концентрацией здесь взвеси, имеющий преимущественно минеральный состав. Так же как и на разрезе Керчь наблюдается зависимость между АУВ и липидами (r=0.79), взвесь и Сорг (r=0.85), Сорг и хл а (r=0.88), взвесь и хл а (r=0.83).

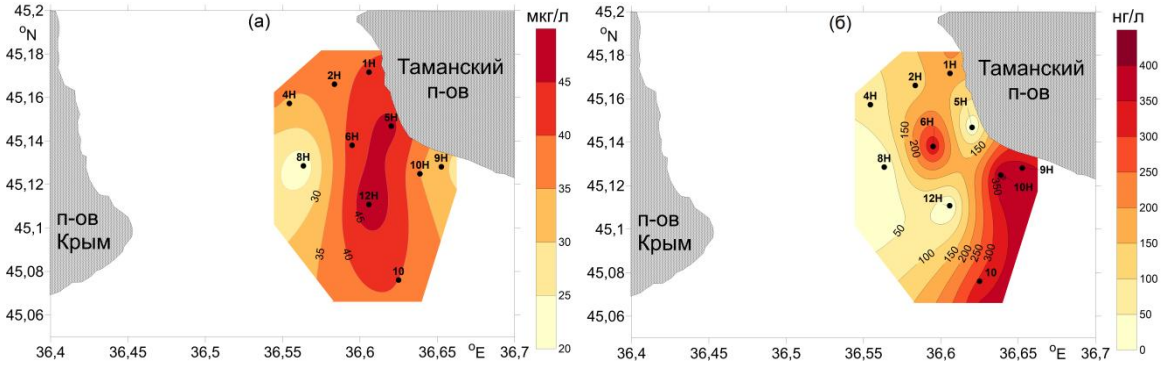


Рис. 1.2.12. Распределение АУВ (а) и ПАУ (б) на полигоне в сентябре 2022 г..

Донные осадки (сентябрь)

Донные осадки в сентябре 2022 г. так же как и в мае имели разнообразный гранулометрический состав и концентрации УВ изменялись в большом диапозоне: для АУВ – 15–22605 мкг/г, для ПАУ – <2–83500 нг/г (рис. 1.2.13, табл. 1.2.6). Наиболее высокие концентрации установлены в акватории Севастополя (АУВ – 22605 мкг/г и ПАУ – 83500 нг/г) и в акватории Туапсе (АУВ – 1555 мкг/г, ПАУ– 2264 нг/г).

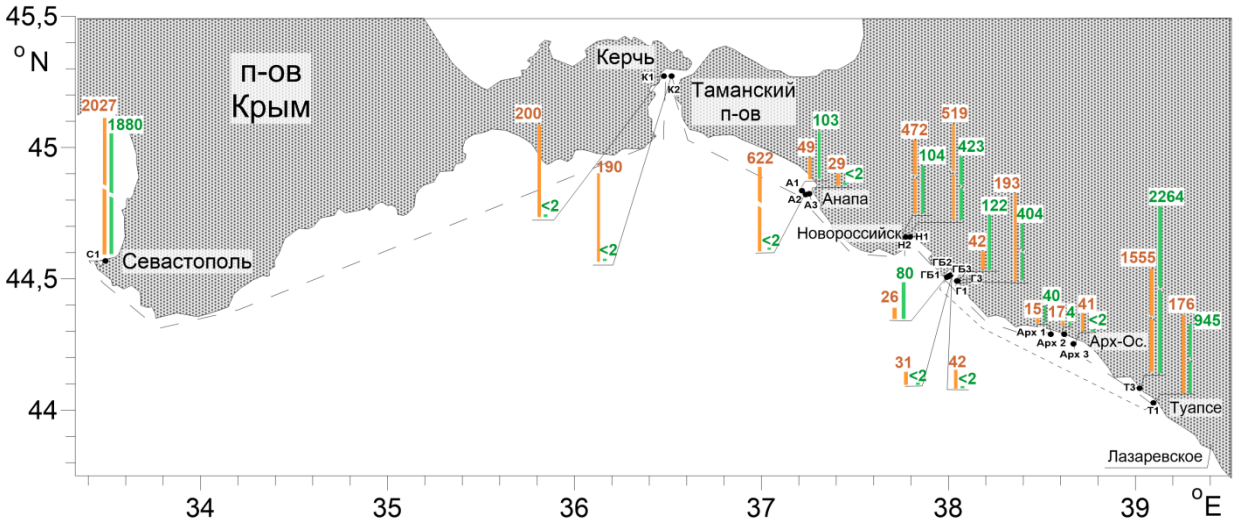


Рис. 1.2.13. Распределение АУВ и ПАУ в поверхностных осадках в сентябре; оранжевые столбцы АУВ (мкг/г), зеленые ПАУ (нг/г).

Наблюдалась зависимость в распределении АУВ и ПАУ (r =0.99), т.е. углеводороды уже в достаточной степени трансформированы и АУВ и влажности (r =0.59). Если учесть, что фоновое содержание АУВ в песчанистых осадках 10 мкг/г, а в илистых – 50 мкг/г, то

в среднем их фон был превышен в 17 раз в песчанистых, в 36 раз в илистых осадках (в пробе Севастополь 2 в 452 раза, соответственно).

Таблица 1.2.6. Результаты анализа поверхностного слоя донных осадков, отобранных в сентябре 2022 г.

Станция	Сокращение	АУВ, мкг/г	Влажность, %	ПАУ, нг/г	Примечание
Геленджик 1	Г1	193	12	404	
Геленджик 3	Г3	42	11	122	
Средняя		117	12	263	
Анапа 1	А1	49	17	103	
Анапа 2	А2	622	19	<2	много камней разных
Анапа 3	А3	29	26	<2	
Средняя		234	21	36	
Керчь 1	К1	200	29	<2	
Керчь 2	К2	190	33	<2	
Средняя		195	31	<2	
Архипо-	Арх1	15	12	40	
Архипо-	Арх2	17	12	4	много мелких камней
Архипо-	Арх3	41	14	<2	много мелких камней
Средняя		24	13	15	
Голубая Бухта 1	ГБ1	26	12	80	много мелких камней
Голубая Бухта 2	ГБ2	31	19	<2	
Голубая Бухта 3	ГБ3	42	20	<2	
Средняя		33	17	28	
Новороссийск 1	Н1	472	17	104	много мелких камней
Новороссийск 2	Н2	519	2	423	много мелких камней
Средняя		495	10	263	
Туапсе 1	Т1	176	10	945	много мелких камней
Туапсе 3	Т3	1555	77	2264	Навеска менее 0.5 г
Средняя		865	44	1604	
Севастопль 1	С1	2027	85	1880	Навеска менее 0.5 г
Севастопль 2	С2	22605	80	83500	Навеска менее 0.5 г
Средняя		12316	82	42690	

Выводы к разделу 1.2

Полученные данные показали, что в мае 2022 г. в акватории Архипо-Осиповки и Туапсе концентрации АУВ в поверхностных водах (в среднем 20-22 мкг/л) практически не отличались от их величин в Геленджикской бухте и были ниже ПДК для нефтяных УВ –50 мкг/л. Тем не менее, наличие трансформированных антропогенных нефтяных алканов, не обнаруженных ранее (в основном в пробах, отобранных в районе Туапсе и

Архипо-Осиповки), может свидетельствовать о возрастающем загрязнении, связанном с интенсификацией хозяйственной деятельности в этом районе.

Концентрации ПАУ в мае 2022 г. изменялись в диапазоне 83 – 133 нг/л, в среднем увеличилось почти в 2 раза по сравнению с 2021 г. Согласно маркерам влияние пирогенных процессов установлено. на ст. 11 в районе Таманского п-ва (ФЛТ/ПР =0.64) Низкие величины отношения Σ(2-3кол.)/Σ(5-6 кол.) – 0.03–0.05 также указывают на их пирогенный источник.

В сентябре 2022 г.по сравнению с маем в поверхностных водах произошло увеличение концентраций УВ: для АУВ почти в 2 раза (в среднем 40 мкг/л), а ПАУ в 2.6 раз (в среднем 141 нг/л). Однако в Керченском проливе (в среднем 40 мкг/л) произошло снижение концентраций, по сравнению с данными 2019–2021 гг. (в среднем 87 мкг/л) [Nemirovskaya et al., 2022]).

Аккумулирование нефтяных загрязняющих веществ происходит в донных осадках, где содержание УВ зависит от их гранулометрического типа. Поэтому концентрации УВ изменялись в большом диапазоне: для АУВ – 28–661 мкг/г, для ПАУ – <2–1014 нг/г (в мае), и для АУВ –17 – 22605 мкг/г, ПАУ – <2– 83500 нг/г (в сентябре). Наиболее высокие концентрации установлены в акватории Севастополя (АУВ – 22605 мкг/г и ПАУ – 83500 нг/г) и в акватории Туапсе (АУВ – 1555 мкг/г, ПАУ– 2264 нг/г).

Концентрации АУВ и ПАУ значительно превосходят фоновые величины (фон в печанистых осадках для АУВ 10 мкг/г, для илистых 50 мкг/г). В 2022 г. фон был превышен в 12 раз в песчанистых (в пробе Туансе-1 в 66 раз) и более, чем в 2 раза в илистых осадках. Кроме того, увеличение концентраций АУВ в составе Сорг (до 21,05% в пробе Туапсе-1, также указывает на загрязненность осадков нефтяными УВ.

Низкие концентрации АУВ (10-16 мкг/г) установлены в песчанистых осадках в районе Архипо-Осиповски, то есть практически фоновые величины. Концентрации ПАУ также были низкими и изменялись от аналитического нуля до 91 нг/г.

Состав ПАУ, как более устойчивого углеводородного класса, во взвеси и особенно в донных осадках, согласно соотношению маркеров, указывает на смешанных генезис полиаренов: нефтяной (увеличение гомологов нафталина), пирогенный (увеличение 5-6 кольчатых ПАУ).

Полученные результаты работ полностью соответствуют требованиям Плана работ научного исследования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ К РАЗДЕЛУ 1.2

Jafarabadi A. R., Dashtbozorg M., Mitra S., Bakhtiari A. R., Dehkordi S. M., Cappello T. Historical sedimentary deposition and ecotoxicological impact of aromatic biomarkers in sediment cores from ten coral reefs of the Persian Gulf, Iran, Science of The Total Environment, Vol. 696, 2019, P. 1-16. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133969

Немировская И.А. Нефть в океане (загрязнение и природные потоки). М.: Научный мир, 2013, 432 с.

AMAP (Arctic Monitoring and Assessment Programme). Chapter 4 Sources, Inputs and Concentrations of Petroleum Hydrocarbons, Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, and other Contaminants Related to Oil and Gas Activities in the Arctic. Oslo, Norway, 2007; Chapter 4. AMAP, 2007, 87 p.

NAS (National Academy of Sciences). Oil in the Sea III: Inputs, Fates, and Effects. National Research Council. Washington, D.C.: The National Academies Press, 2003. 265 p.

Witt G., Matthaus W. The impact of salt water inflows on the distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in the deep water of the Baltic Sea // Mar Chem. 2001. V.74. P. 279–301. https://doi.org/10.1016/S0304-4203(01)00020-2

Петров А.А. Углеводороды нефти. М.: Наука, 1984. 263 с.

Качество морских вод по гидрохимическим показателям. Ежегодник 2020. / Под ред. Коршенко А.Н. Иваново: ПресСто, 2022. 240 с.

Monitoring of hazardous substances in the White Sea and Pechora Sea: harmonisation with OSPAR's Coordinated Environmental Monitoring Programme (CEMP) Tromsø: Akvaplan-niva, 2011, 71p.

Nemirovskaya I.A., Zavialov P. O, Khramtsova A. V. Hydrocarbon pollution in the waters and sediments of the Kerch Strait// Marine Pollution Bulletin 2022. 180 113760 doi.org /10.1016/j.marpolbul.2022.113760

1.3 Описание видового состава обрастаний на морском пластике

Материалы

В 2022 году обрастания пластикового мусора на Чёрном море изучали по материалам двух экспедиций. Первая из них проходила в середине мая и охватила прибрежные участки акватории в районах Геленджикской бухты, пос. Дивноморский, а также протяжённые фрагменты скалистого участка побережья между Голубой бухтой (ЮО ИО РАН) и пос. Кабардинка (берег горного массива Дооб). В ходе экспедиции был отобран обширный спектр образцов макропластика с побережья (ПЭТ, ПП, ПЭВД, ПЭНД, ПВХ, ПУ, ПС и ППС), а также несколько разнотипных образцов (ПЭТ-бутылки, ПЭВД-пакеты и плёнки) с акватории. Вторая экспедиция проходила в октябре, в районах от

Керченского пролива и до Адлера, и позволила собрать большое количество образцов обросшего макропластика (ПЭТ, ПП, ПЭВД, ПС и ППС) вдоль российского побережья Северного Кавказа. Также к подготовке настоящего отчёта мы считаем целесообразным привлечь материалы, полученные в экспедиции, проходившей в августе 2021 года в районе Керченкого пролива: на этом участке удалось отобрать несколько образцов ПЭВД-плёнок, плававших по поверхности моря на солидном расстоянии от берега. С высокой вероятностью, а также по результатам изучения их обрастаний, они были привнесены на акваторию не с берега, а с кораблей, стоявших на рейде на этом участке. Также были изучены образцы макропластика (ПЭТ-бутылки, ПП-стаканы и ПЭВД-плёнки), вынесенные на побережье реками Сукко и Ашамбэ, а также принесённые на скалистые берега морем - и отобранные для анализа в ходе весенней экспедиции ИОРАН в район Утришского заповедника (март 2021 года) и осенней экспедиции (сентябрь-октябрь 2021 года) в районы Геленджикской и Голубой бухт и пос. Дивноморский.

Методы исследования видового состава обрастаний.

Все образцы были отобраны ручным методом. Те из них, на которых просматривались влажные биоплёнки, были фрагментированы с помощью ножниц накуски примерно прямоугольной формы, размером 4х3 см, и поделены на две группы: первую фиксировали в ПЭТ-флаконах (50 мл) раствором этанола, вторую экспонировали в морской воде с места отбора, также в ПЭТ-флаконах (225 мл), сохраняя в холодильнике с подсветкой, при температуре 8°С. Такой метод хранения позволил сохранить обрастания в живом виде, поддерживая их длительное время (2-3 недели) в облике, наиболее приближенном к имевшему место на момент сбора материала. В свою очередь, макропластик, покрытый обсохшими биоплёнками, также нарезали на кусочки аналогичного размера, но хранили в зип-пакетах, без увлажнения и фиксации.

Микрообрастания влажных образцов изучали с использованием световой (микроскопы Leica DMLS, Leica DM2500, Carl Zeiss Primo Star и Микромед 1Л с приставками для фотодокументирования Levenhuk, Leica и BlackView) и электронной микроскопии (СЭМ: JEOL JSM-6380LA и Cambridge Instruments CamScan S2). Наблюдения с помощью световых микроскопов проводили при увеличениях х200, х400 и х1000, с помощью СЭМ – до х20000. Сухие образцы просматривали с помощью стереомикроскопа Leica, при увеличении х10-х200. Макрообрастания изучали на сухих и влажных образцах, с помощью стереомикроскопа Leica, на увеличениях х10-х50. Для идентификации видов организмов-обрастателей пользовались современными атласами и определителями, в т.ч. интерактивными (Krammer, 1982, 1986, 1997a, 1997b, 2002, 2003; Lange-Bertalot, 1999, 2001; Diatoms of the European Inland Waters and Comparable Habitats,

2000, 2001a, 2001b, 2003, 2009, 2013, 2000-2013; Komarek, Anagnostidis, 1998, 2005; Komarek, 2013; Komarek et al., 2014). Таксономию видов выверяли согласно данным порталов WoRMS (World Register of Marine Species, https://www.marinespecies.org/) и AlgaeBase (Listing the World`s Algae, https://www.algaebase.org/).

Результаты анализа видового состава обрастаний

Анализ обширного материала позволил сделать ряд заключений об особенностях состава обрастаний, характерных для морского макропластика, различными путями попадающего на акваторию Чёрного моря.

На акватории Чёрного моря встречается макропластик, попадающий туда тремя разными путями – из рек, с побережья, а также с различных судов. Наши наблюдения показали, что состав обрастаний на пластике разного происхождения неодинаков.

Макрообрастания, организуемые преимущественно сидячими беспозвоночными-фильтраторами, развиваются на поверхности твёрдого пластика (ПЭТ, ПУ, ПЭНД, ПП), длительное время пребывающего на акватории. В первую очередь они характерны для фрагментов, попадающих в воду на открытых участках моря, т.е. с борта судов. Перемещаясь вдали от берегов, по поверхности моря, такие фрагменты не подвергаются воздействию накатных волн и не контактируют с ландшафтами побережья. Таким образом, они не подвергаются поверхностной абразии в результате контакта со скалами, песком и береговыми сооружениями, и на их поверхности могут развиваться колониальные поселения усоногих раков, мшанок и моллюсков. Рано или поздно такие образцы либо тонут под тяжестью оброста, либо их прибивает к берегу во время сильных сезонных штормов. Макрообрастание начинается с появления на поверхностях – преимущественно на внутренних, более защищённых от ультрафиолета и других агрессивных факторов среды – рассеянного колониального поселения Amphibalanus improvisus. Эти усоногие раки развиваются не только на пластике, но и на плавающих по поверхности Чёрного моря стеклянных ёмкостях и фрагментах дерева. Особенно густой оброст они формируют на внутренних поверхностях ПЭНД-канистр, ПП-вёдер и обуви из ПУ. Пробки на закрытых ПЭТ-бутылках обильно обрастают этим видом снаружи.

Следующим этапом формирования обрастаний является развитие колониальных поселений моллюсков-фильтраторов: Mytilus galloprovincialis и Mytilaster lineatus. Как правило, рост молодых особей этих видов происходит среди особей и колоний A. improvises (рисунок 1.3.1). На таких субстратах, как плавучие «шлёпки» из ПУ, эти моллюски способны формировать мощный оброст в виде густых «щёток», полностью изолируя первичное поселение A. improvisus от контакта с внешней средой.

Рисунок 1.3.1 – Средняя стадия развития колониальных поселений из моллюсков Mytilaster lineatus и морских желудей Amphibalanus improvisus на обуви из полиуретана, долгое время плававшей в море. Время обрастания, исходя из размеров особей организмов - примерно 1 месяц

Альтернативным, но чаще сопутствующим вариантом вторичного обрастания на макропластике открытых акваторий является колонизация мшанками Membranipora cf. membranaceae. Разрастаясь на молодых поселениях амфибалянусов, эти стелящиеся колонии способны полностью скрывать их под собой, а также переходить на свободные от макрообрастаний участки поверхности. Мы часто встречали канистры из ПЭНД, большая часть внутренней поверхности которых была покрыта сплошным обростом из M. cf. membranaceae. Митилид этот вид мшанок покрывает менее эффективно, но, по мере разрастания его колоний, способен скрывать под собой и их.

Следующим этапом формирования оброста является поселение ювенильных стадий двустворчатого моллюска-фильтратора Anadara kagoshimensis. Особи этого вида, формирующиеся при оседании пелагических личинок, крепятся к плавучему пластику с помощью волокон биссуса – так же, как это делают на всех стадиях постличиночного развития митилиды. Однако, если развитие ювенильных стадий A. kagoshimensis на грунте происходит в прикреплённом состоянии (как правило, к взрослым особям) только на ранних стадиях, до возраста менее года, то на плавучем пластике (обуви из ПУ, реже на канистрах из ПЭНД, ещё реже на вёдрах из ПП) они способны крепиться с помощью биссуса до трёхлетнего возраста. Локализуются эти моллюски чаще среди поселений митилид, в их краевой зоне, редко колонизируя открытые поверхности пластика.

Следующей стадией развития обрастания является появление подвижных равноногих раков Sphaeroma serratum, Lekanesphaera monodi и Stenosoma capito – они поселяются среди поселений моллюсков-фильтраторов и обитают там в небольших

количествах. Все три вида были отмечены нами ранее на фрагментах древесины, плававших по поверхности открытых акваторий Чёрного моря. Первые два встречались нам среди обрастаний обуви из ПУ, третий же неоднократно был замечен в обросте самых разных пластиковых предметов.

Микрообрастание развивается успешно на макропластике, однако имеет свои особенности на фрагментах различного происхождения. Наблюдения показали, что поверхности ПЭВД, ПЭТ и ПП, обнаруженных в устьях рек, бывают разностепенно плотно покрыты диатомеями из Gomphonema spp., Cymbella spp., Ctenophora pulchella, Cocconeis placentula, C. euglypta и C. lineata, зелёными нитчатыми коркообразующими водорослями Microthamnion spp., а также обильными колониальными поселениями сидячих панцирных амёб из семейства микрогромиид (Cercozoa: Granofilosea: Microgromiidae), обитающих в мелких (5-7 мкм) домиках из выделяемых ими экзополимеров, инкрустированных оксидом железа до бурой окраски. Когда фрагменты с таким обростом выносятся в море, пресноводные виды гибнут, оставляя после себя субстрат для образования сапрофитной бактериальной плёнки. На этой плёнке, в свою очередь, начинается построение морского микрообрастания. Первыми эукариотами, массово колонизирующими эти субстраты, являются диатомеи Cylindrotheca closterium, выстраивающие сети из волокон, сложенных движущимися или статичными клетками. Следом за ними приходят сидячие диатомеи Synedra sp., формирующие разноплотные поселения на участках, заселённых бактериальными колониями не слишком густо. Также прямо на бактериальных плёнках – на их относительно прозрачных участках - формируются компактные поселения диатомей Halamphora coffeaeformis и H. tenerrima, стелятся тонкотрихомные виды цианобактерий Geitlerinema sp., образуют разреженные группы гетеротрофные жгутиконосцы Bodo sphaericum, крепящиеся одним жгутом к субстрату, а также сидячие виды морских солнечников (Heliozoa). Дальнейшее обрастание происходит при участии трубчатых колоний диатомей (Berkeleya rutilans, Navicula pontica), а также морских корковых зелёных водорослей Ulvella lens, стелящихся трихомов Leptolyngbya sp., и, на ПЭ-плёнках, коккоидных цианобактерий из рода Chroococcidiopsis (рисунок 1.3.2). Также в составе обрастаний вторично-морского пластика, на бактериальных плёнках было отмечено образование проростков талломов морских нитчатых бурых и красных водорослей.

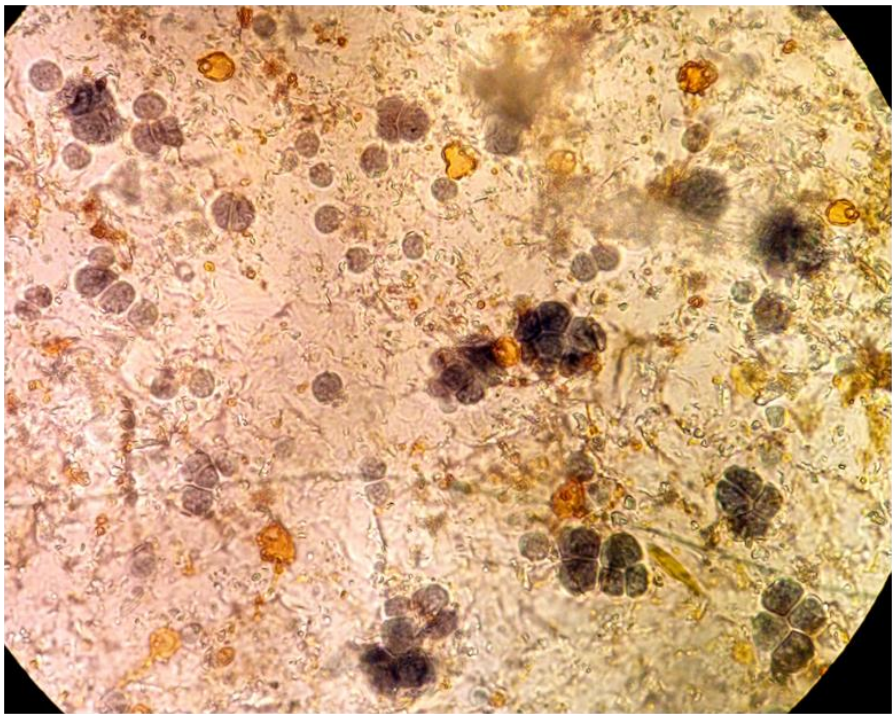


Рисунок 1.3.2 – Поздняя стадия развития микрообрастания (микропластона) на ПЭВД-плёнке, привнесённой из реки Ашамбы в прибрежную зону моря. На мелкообразивной поверхности образовался рассеянный оброст из отдельных клеток и небольших пакетов цианобактерий Chroococcidiopsis sp. (лиловые и оливковые гранулы), ранее не описанных для черноморских биотопов. Также видны домики отмерших амёб из семейства микрогромиид (рыжие капсулы разных форм со светлым выходным отверстием). Увеличено в 400 крат.

Пластик, приходящий в море с берега и многократно повторно возвращающийся на берег, по большей части был представлен ПЭТ-бутылками, ПП-стаканами, ПС-упаковкой (контейнерами) для кондитерских изделий, ПЭ-плёнками, а также ППС – упаковочным пенопластом. Все эти фрагменты непериодически выносятся на берег штормовыми волнами, трутся о гальку, песок и скалы, постепенно обсыхая и окисляясь на солнечном свете, а затем снова попадают в море. При этом их поверхности подвергаются существенной механической абразии, усугубляемой воздействием ультрафиолета. При ветрах с берега эти фрагменты часто снова попадают в море. На фоне таких миграций их обрастание повторяется и, как правило, носит однотипный характер. Макропластик всех перечисленных типов, кроме ППС, сначала обрастает кустящимися формами цианобактерий, одетыми в толстые, часто многослойные чехлы из выделяемых ими экзополимеров. Это виды из рода Calothrix, среди которых верхний, наиболее густой ярус формируют раскидистые крутинки длиннотрихомного C. parietina, а нижний – короткотрихомные, растущие компактными группами трихомы C. fusca и его подвиды.

Самый нижний, корковый ярус на этих субстратах формируют виды Ulvella spp. В основаниях куртинок Calothrix, под прикрытием их чехлов, обильно развиваюбтся мелкие эпифитные виды диатомей, такие как Cocconeis neothumensis, Halamphora tenerrima, H. aff. luciae, H. coffeaeformis, Mastogloia pusilla и M. aff. urviae. Выше, среди трихомов, а также на открытых участках пластика, часто встречаются крупные клетки Masatogloia lanceolata, одетые в многослойные прозрачные капсулы.

На старых куртинках C. parietina, в их верхней части, можно наблюдать обильное развитие эпифитных диатомей Striatella unipunctata и Berkeleya micans. На некоторых непрозрачных изделиях из ПЭНД, таких как флаконы из-под масел и косметики, а также на сильно спрессованном мелкозернистом ППС развивается крупнотрихомный Calothrix confervicola. Куртинки Calothrix разных видов активно используют для прикрепления сильно абразивные участки поверхности пластика, механически расширяя царапины и микротрещины при разрастании трихомов.

Обрастания крупнозернистого ППС были сформированы исключительно бактериальными колониями, оконтуривающими отдельные зёрна полимера и, как показало микроскопирование срезов, проникающими в их толщу в форме ветвящихся разрастаний. Колонии имели красно-бурую окраску (рисунок 1.3.3).

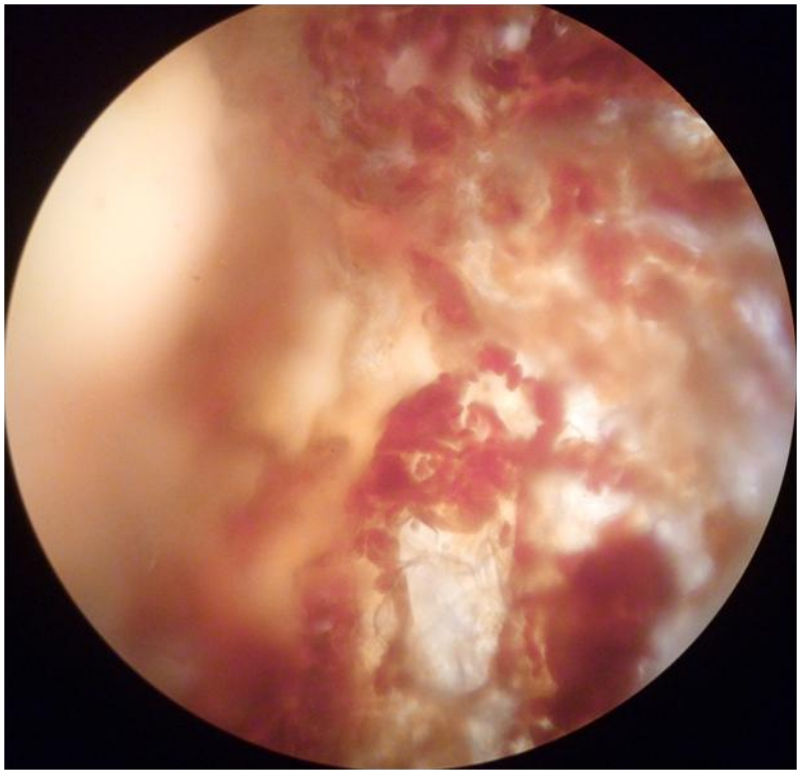


Рисунок 1.3.3 – Колонии бактерий, имеющие красную окраску, разросшиеся в толще пенистых гранул фрагмента пенополистирола (ППС) из состава прибрежного пластикового мусора. Увеличено в 400 крат

Основываясь на данных наших коллег, исследовавших бактериальные обрастания ППС в районе Геленджика (Tourova et al., 2020), мы предполагаем, что основным компонентом этих биоплёнок на фрагментах, непериодически выносимых на берег, были бактерии из рода Erythrobacter (класс Alphaproteobacteria).

Пластик, попадающий на изученные нами участки акватории не с берега и не из рек (предположительно – с борта судов) чаще всего был представлен плавающими ПЭТ-бутылками и ПЭ-плёнками. Эти образцы отличались практически полным отсутствием механической абразии. На их поверхности развивался оброст из прикреплённых видов диатомей, образующих компактные колониальные поселения, разнесённые друг от друга на ландшафте поверхности (рисунок 1.3.4).

Здесь обитали Cocconeis scutellum, C. stauroneiformis, Tabularia cf. waernii, Neosynedra provincialis, Cylindrotheca closterium, Nitzschia sp., Amphora helenensis, Halamphora coffeaeformis, Mastogloia pusilla, M. cf. pumila (последние два вида - в многослойных прозрачных капсулах, среди которых жили группы клеток Halamphora tenerrima), а также тонкотрихомные стелящиеся цианобактерии Leptolyngbya sp.

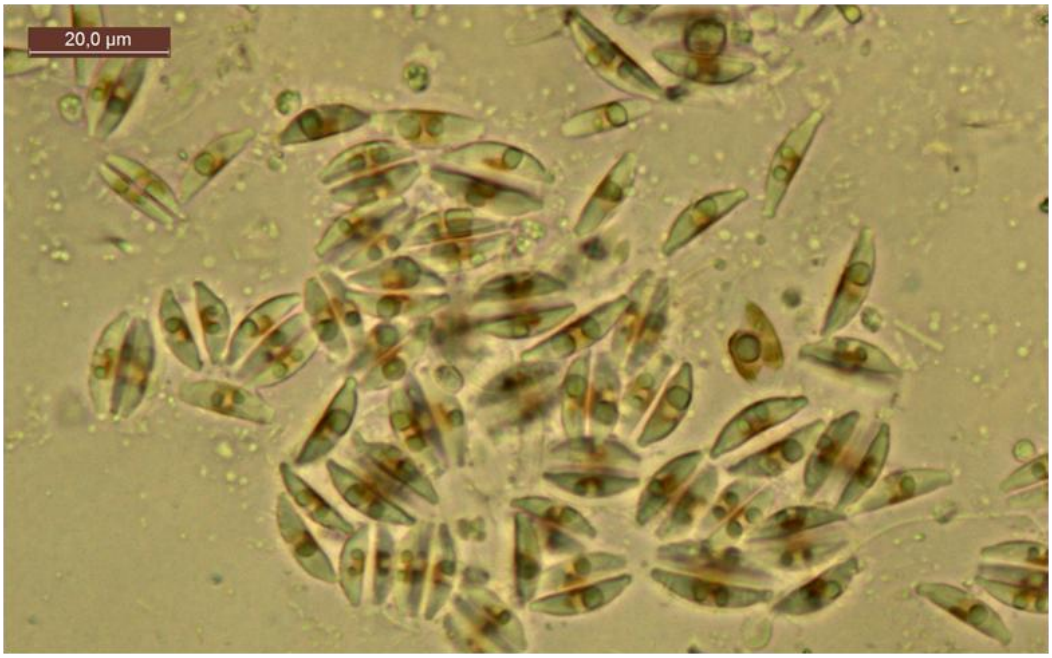


Рисунок 1.3.4 – Относительное молодое компактное колониальное поселение диатомей Halamphora coffeaeformis на поверхности ПЭТ-бутылки, продолжительное время плававшей по черноморской акватории вдали от берегов. Материал синтетического полимера не покрыт абразионными царапинами. Увеличено в 1000 крат.

Выводы к разделу 1.3

Полученные результаты работ полностью соответствуют требованиям Плана работ научного исследования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ К РАЗДЕЛУ 1.3

1. Diatoms of the European Inland Waters and Comparable Habitats. Edited by H. Lange - Bertalot. Volume 5: Levkov, Zlatko: Amphora sensu lato. 2009. 287 photogr. plates. 916 p. gr8vo. Hardcover. (ISBN 978-3-906166-73-5)
2. Diatoms of the European Inland Waters and Comparable Habitats. Ed. by H. Lange - Bertalot: Volume 07: Levkov, Z., D.Metzeltin and A. Pavlov: Luticola and Luticolopsis. 2013. 18 & 203 photogr. pls. (mostly SEM, and some LM). 697 p. gr8vo. Hardcover. (ISBN 978-3-87429-439-3)
3. Diatoms of the European Inland Waters and Comparable Habitats. Edited by Horst Lange-Bertalot. Volumes 1 - 7. 2000 - 2013.
4. Diatoms of the European Inland Waters and Comparable Habitats. Edited by Horst Lange-Bertalot. Volume 2: Lange-Bertalot, Horst: Navicula sensu stricto, 10 Genera Separated from Navicula sensu stricto, Frustulia. 2001. 140 photographic plates. 526 p. gr8vo. Hardcover. (ISBN 978-3-904144-78-0)
5. Diatoms of the European Inland Waters and Comparable Habitats. Edited by Horst Lange-Bertalot. Volume 1: Krammer, Kurt: The genus PINNULARIA. 2000. 217 plates of micrographs. 703 p. gr8vo. Hardcover. (ISBN 978-3-904144-24-7)
6. Diatoms of the European Inland Waters and Comparable Habitats. Edited by H. Lange-Bertalot. Volume 4: Krammer, Kurt: Cymbopleura, Delicata, Navicymbula, Gomphocymbellopsis, Afrocymbella Supplements to cymbelloid taxa. 2003. Many figures in the text. 164 photogr. plates. IV, 530 p. gr8vo. Hardcover. (ISBN 978-3-904144-99-5)
7. Krammer K. Micromorphology of diatom valves / K. Krammer // Valve morphology in the genus Cymbella / C. A. Agardh. – 1982. – Vol. 11. – 299 p.
8. Krammer K. Bacillariophyceae. 1. Teil: Naviculaceae / K. Krammer, H. Lange-Bertalot // Susswasserflora von Mitteleuropa. – Stuttgart-Jena : Gustav Fischer Verlag, 1986. – Bd. 2/1. – 876 p.

9. Krammer K. Die cymbelloiden Diatomeen. Teil 1. Allgemeines und Encyonema Part. / K. Krammer // Bibliotheca Diatomologica. – Stuttgart : J. Cramer, 1997. – Bd. 36. – 382 p.
10. Krammer K. Die cymbelloiden Diatomeen. Teil 2. Encyonema part., Encyonopsis and Cymbellopsis / K. Krammer // Bibliotheca Diatomologica. – Stuttgart : J. Cramer, 1997. – Bd. 37. – 469 p.
11. Krammer K. Cymbella / K. Krammer // Diatoms of Europe. – Germany, Königstein : Gantner Verlag K. G., 2002. – Bd. 3. – 584 p.
12. Krammer K. Cymbopleura, Delicata, Navicymbula, Gomphocymbellopsis, Afrocymbella / K. Krammer // Diatoms of Europe. – Königstein : Gantner Verlag K. G., 2003. – Vol. 4. – 530 p.
13. Lange-Bertalot H. Diatoms from Siberia I / H. Lange-Bertalot, S. I. Genkal // Iconographia Diatomologica. – Germany, Königstein : Gantner Verlag K. G., 1999. – Vol. 6. – 292 p.
14. Lange-Bertalot H. Navicula sensu stricto 10 Genera Separated from Navicula sensu lato Frustulia / H. Lange-Bertalot // Diatoms Europe. – Germany, Königstein : Gantner Verlag K. G., 2001. – Vol. 2. – 526 p.
15. Komárek J. 2013. Cyanoprokaryota. 3. Heterocytous genera. Süsswasserflora von Mitteleuropa. Bd. 19(3). Berlin: 1130 S.
16. Komárek J., Kaštovský J. Mareš J., Joha sen J. R. 2014. Taxonomic classification of cyanoprokaryotes (cyanobacterial genera) 2014, using a polyphasic approach. Preslia. 86: 295–335.
17. Komárek J., Anagnostidis K. 1998. Cyanoprokaryota. 1. Chroococcales. Süsswasserflora von Mitteleuropa. Bd. 19(1). Berlin: 548 S.
18. Komárek J., Anagnostidis K. 2005. Cyanoprokaryota. 2. Oscillatoriales. Süsswasserflora von Mitteleuropa. Bd. 19(2). München: 759 S.
19. Tourova T, Sokolova D, Nazina T, Grouzdev D, Kurshev E, Laptev A. Biodiversity of Microorganisms Colonizing the Surface of Polystyrene Samples Exposed to Different Aqueous Environments. Sustainability. 2020; 12(9):3624.

1.4. Описание свойств внутренних волн по данным измерений кластеров термокос

Среди короткопериодных и субмезомасштабных гидрофизических процессов в природных стратифицированных водоемах внутренние волны (ВВ) занимают особое место. Во-первых, это наиболее хорошо организованный и регулярный процесс, имеющий ярко выраженный колебательный характер. Во-вторых, это один из самых быстрых механизмов переноса энергии и импульса в толще вод на большое расстояние. В-третьих, и в главных, неустойчивость и обрушение ВВ является одним из основных источников энергии мелкомасштабного турбулентного перемешивания вод океана [Munk, Wunch, 1998].

Анализ результатов статистической обработки данных измерений дал основания сделать некоторые выводы: колебания температуры в рассмотремом диапазоне частот, характерных для ВВ, обладают хорошо выраженной перемежаемостью во времени, т.е. интервалы времени с интенсивными колебаниями сменяются интервалами времени с малыми амплитудами; энергия колебаний поля температуры существенно зависит от стратификации и достигает максимума для всех рассмотренных частот в слое максимального вертикального градиента температуры; на некоторых интервалах времени наблюдается достаточно высокая когерентность колебаний температуры, измеренной различными датчиками, как по вертикали, так и по горизонтали. По фазовым соотношениям для рядов с большой когерентностью были рассчитаны параметры ВВ, в частности, их длина и фазовая скорость. При этом фазовая скорость для волн с периодами от 50 до 300 мин. Оказалась приблизительно одинаковой и равной 10 см/с, что сопоставимо с оценкой скорости по двуслойной модели – 20 см/с.

Благодаря высоким значениям частоты измерений их точности и вертикальному разрешению, удалось надежно выделить несколько десятков случаев распространения цугов короткопериодных ВВ (от трех колебаний и более) и оценить не статистически, а «индивидуально» такие их параметры, как амплитуда, период, длина и фазовая скорость для тех волн, которые наблюдались на всех трех термокосах в Кластере. Кроме того, установлены статистически достоверные зависимости фазовой скорости ВВ от параметров температурной стратификации, глубины моря, а также параметра нелинейности ВВ.

Кластер размещён на акватории Полигона «Геленджик» на глубине дна около 26 м. Термокосы устанавливались в вершинах треугольника, со сторонами, не вполне равными друг другу и изменявшимися от постановки к постановке, в диапазоне от 38 до 127 м. Они были подсоединены к бронированному оптоволоконному кабелю с двумя токопроводящими жилами, по которому осуществляется питание приборов, а оперативная передача данных измерений на береговой сервер производится по оптоволокну.

Каждая термокоса состоит из 21 термодатчика и 3-х датчиков давления (на верхнем, среднем и нижнем горизонтах) сопряженных в едином корпусе с термодатчиками, расположенными на тех же горизонтах. Датчики располагаются на одинаковом расстоянии друг от друга, составляющем 1 м. Термокосы размещаются на заякоренных буйковых станциях с подповерхностной плавучестью, притопленной на глубину 5-6 метров. Точность измерений температуры составляет 0.01°C, период измерения – 10 с.

Примеры зарегистрированных ВВ, а также соответствующие им профили температуры в начале и в конце цикла измерений приведены на рисунках 1.4.1-1.4.4. Зарегистрированные цуги ВВ были разделены по типам их проявления:

- в верхнем слое (рисунок 1.4.1);
- в нижнем слое (рисунок 1.4.2);
- в толще термоклина (рисунок 1.4.3);
- по всей водной толще (рисунок 1.4.4)

Амплитуда волны рассчитывалась как $a = {\Delta T}/{\left({dT}/{dz}\right)}$, ΔT – отклонение температуры от среднего значения на заданном горизонте за счет ВВ, а ${dT}/{dz}$ – средний градиент температуры в окрестности заданного горизонта.

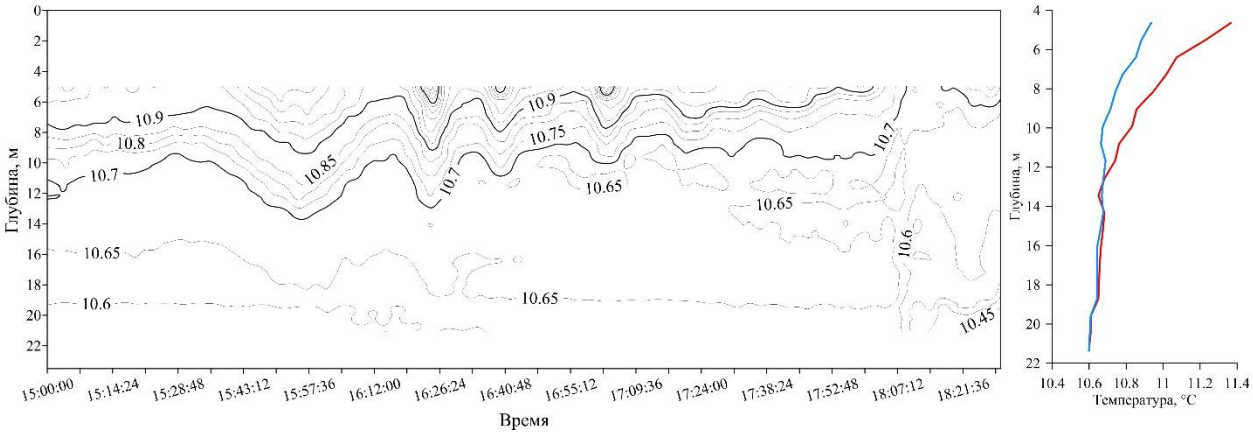


Рисунок1.4.1 – Пример цуга ВВ в верхнем слое. Слева: временная развертка показаний температурных датчиков на одной из термокос 09 мая 2022 г. в период с 15:00 по 18:30. Справа: вертикальные распределения температуры в начале периода (синяя) и в конце (красная) кривые

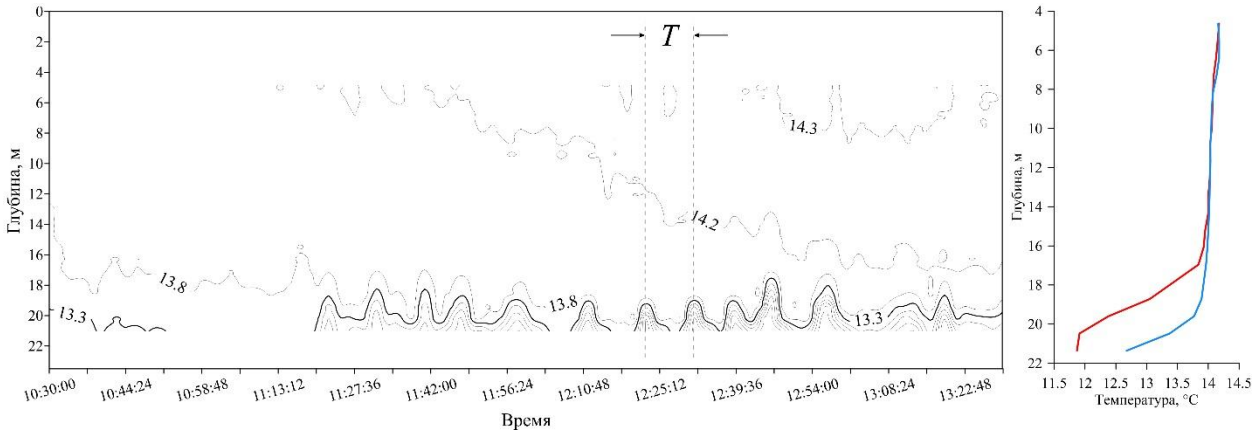


Рисунок 1.4.2 – Пример цуга высокоамплитудных ВВ в нижнем слое. Слева: временная развертка показаний температурных датчиков на одной из термокос 13 мая 2022 г. в период с 10:30 по 13:30. Буквой Т обозначен период ВВ, как время между двумя минимумами температуры на одном и том же датчике. Справа: вертикальные распределения температуры в начале периода (синяя) и в конце (красная) кривые

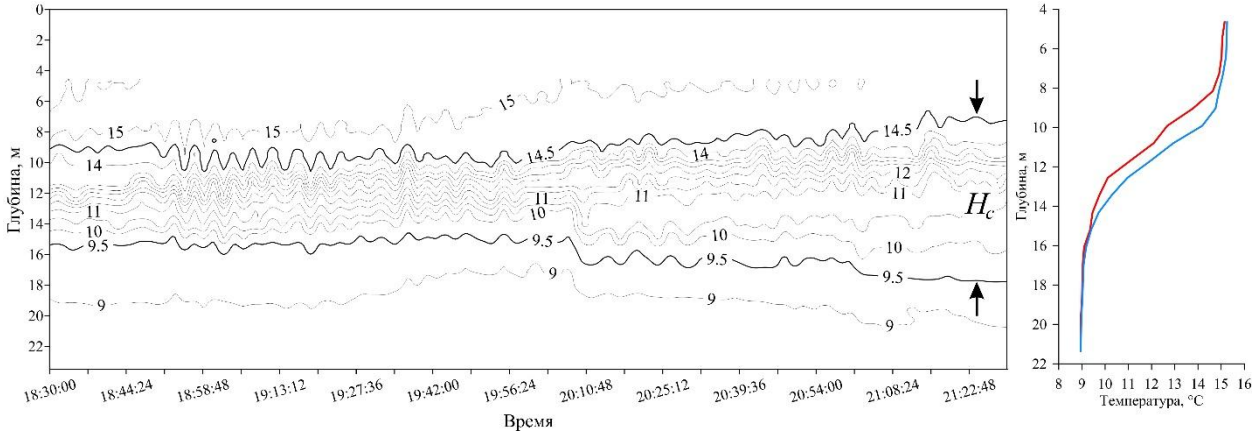


Рисунок 1.4.3 – Пример цуга низкоамплитудных ВВ сосредоточенных внутри промежуточного слоя толщиной H_c в термоклине. Слева: временная развертка показаний температурных датчиков на одной из термокос 19 мая 2022 г. в период с 18:30 по 21:30. Справа: вертикальные распределения температуры в начале периода (синяя) и в конце (красная) кривые

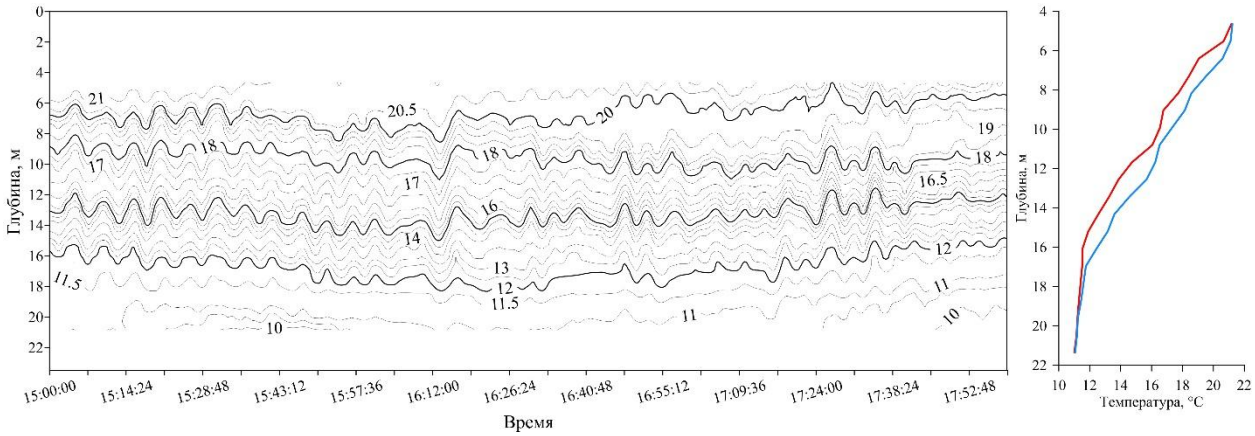


Рисунок 1.4.4 – Пример цугов низкоамплитудных ВВ охватывающих практически весь термоклин. Слева: временная развертка показаний температурных датчиков на одной из термокос 18 июня 2022 г. в период с 15:00 по 18:00. Справа: вертикальные распределения температуры в начале периода (синяя) и в конце (красная) кривые

Фазовая скорость ВВ (модуль и направление) рассчитывалась по алгоритму, описанному в [Очередник и др. 2020). В этом алгоритме используются значения времени задержки прохождения определенной фазы ВВ через две другие термокосы относительно «начальной».

Длина волны λ рассчитывалась на основе ее определения, из которого следует, что $\lambda = c \cdot T_{iw}$.

Средние значения параметров λ, c, T_{iw} и a для каждого наблюденного цуга ВВ приведены в таблице 1.4.1. В этой же таблице приведены значения средней по глубине водного слоя значения частоты Вяйсяля – Брента N_T, рассчитанной по температурному профилю с использованием формулы:

$$N_T = \sqrt{g\alpha \frac{\Delta T}{H_o}}$$

где α – коэффициент термического расширения (КТР) морской воды. T – температура, ΔT – перепад температуры между верхним и нижним датчиками, H_o – глубина места, которая считается постоянной на масштабе полигона и равной 26 м. В ней также приводятся значения еще одного параметра H_c – толщины слоя, в котором наблюдались внутриволновые колебания (см. рисунок 1.4.3).

Основные направления ВВ

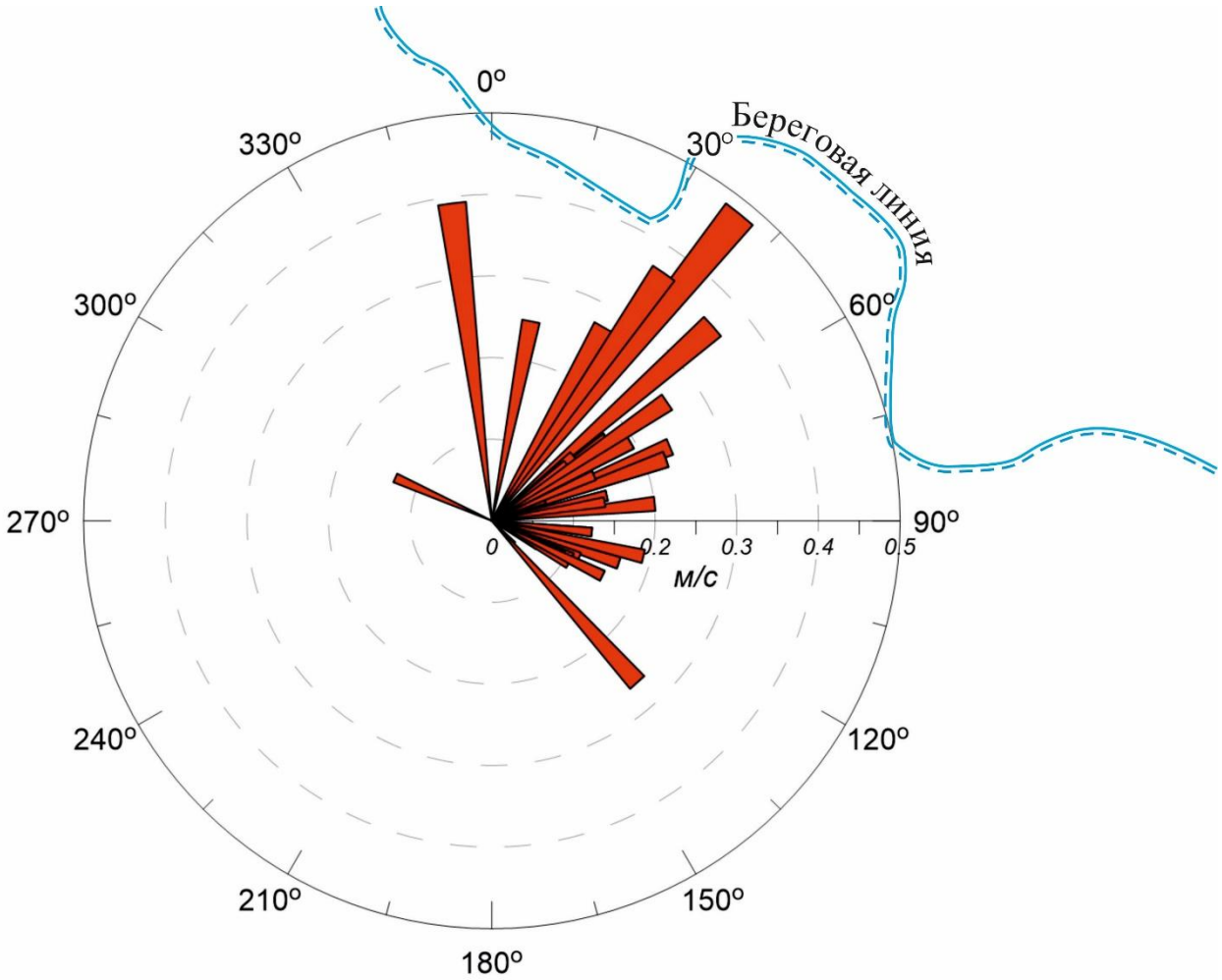


Рисунок 1.4.5 – Направления и скорости распространения ВВ в области Кластера. Пунктирная линия – берег

Выполнен анализ пространственно-временной изменчивости температурной стратификации вод на внутреннем шельфе Черного моря на основе данных измерений кластера термокос, изготовленных в ЮО ИОРАН (Очередник и др., 2019). Кластер состоял из 3-х термокос на заякоренных буйковых станциях, установленных на глубинах 24-28 м в вершинах треугольника со сторонами порядка 40-130 м. Термокосы длиной около 20 м производили частые (раз в 10 с) измерения температуры с помощью чувствительных датчиков, расположенных по вертикали со скважностью менее 1 м.

Установлено, что одним из факторов, вызывающих сильную короткопериодную изменчивость температурной стратификации в весеннее и раннелетнее время (апрель – июнь) являются цуги внутренних волн. Фактически ВВ, наблюдаются в весеннее и раннелетнее время (апрель, май, июнь). В апреле кол-во ВВ состаляет примерно 30-35%, в мае – 50-55% и 10-15% в июне. В другие летние и осенние месяцы случаи появления ВВ на внутреннем шельфе были существенно более редкими из-за заглубления ВКС и опускания термоклина на дно.

Рассчитаны значения периода ВВ, их фазовой скорости распространения (величина и направление), длины и амплитуды, а также оценено количество ВВ цуге. Оказалось, что преимущественно, ВВ распространяются из глубоководной части моря на берег и часто обнаруживаются во фронтальных зонах, связанных с вторжением более теплых или, холодных вод на акваторию кластера. Значения модуля фазовой скорости ВВ изменялись в диапазоне от 5 до 40 см/с. При этом длина волны изменялась от 25 до 250 м, амплитуда – от 1 до 10 м. Количество волн в цуге варьировалось от 3 до 16. Одиночные волновые возмущения не принимались в расчет.

Выводы к разделу 1.4.

Полученные результаты работ полностью соответствуют требованиям Плана работ научного исследования.

1.5. Адаптированная к северо-восточному черноморскому шельфу методика автоматического детектирования и картирования морского мусора

В современных реалиях высокой антропогенной нагрузки на морские экосистемы едва ли не самой значительной по своему масштабу и долговременным негативным последствиям является проблема морского мусора, объем которого увеличивается год от года. В условиях растущего накопления морского мусора мировое сообщество, политики и промышленность, похоже, теперь осознают важность разработки и внедрения новых решений для борьбы с морским мусором. Эти решения должны быть эффективными и устойчивыми, включая инновационные технологии и новые методы предотвращения, мониторинга и очистки морей и океанов [Bellou et al., 2021].

В период с 1990 по 2015 год около 26–91 млн. тонн мусора поступили в Мировой океан [Laufkötter et al., 2015], большая часть которого представляла собой пластиковый мусор (61–87%) [Agamuthu et al., 2019]. При этом, главное внимание должно уделяться поверхности океана и поверхностному слою, так как минимум 5.25 трлн частиц мусора плавает в океане [Eriksen et al., 2014]. До сих пор основным методом мониторинга взвешенного в толще воды вблизи поверхности и плавающего на поверхности моря мусора является визуальное наблюдение и учет вручную. Тем актуальнее перед наукой стоит задача разработать и внедрить в практику рутинного экологического мониторинга водных бассейнов автоматические и полуавтоматические методы и средства обнаружения и подсчета морского мусора, как на морской поверхности, так и в толще воды.

Для решения данной задачи нашим коллективом было предложено использование лазерного лидара [Palmer, Pelevin et al., 2013] для детектирования морского мусора в верхнем квазиоднородном слое (ВКС) моря, впервые в мировой практике флуоресцентного дистанционного лазерного зондирования водных объектов [Якушкин, Пелевин, Завьялов, 2021]. По своей сути в рамках настоящего проекта была проведена адаптация этой методики к ее применению на северо-восточном шельфе Черного моря, а также ее верификация по данным натурных экспериментов с различными образцами мусора. Для лучшей адаптации нами была собрана большая коллекция образцов морского мусора. В связи с тем, что также в ходе экспериментов были учтены различные факторы, связанные со спецификой морского лазерного зондирования с борта судна, методика детектирования морского мусора в ВКС была значительно доработана в ходе адаптации к условиям северо-восточного черноморского шельфа.

Для обнаружения мусора должен использоваться высокочастотный сканирующий флуоресцентный лидар, который на ходу судна посылает лазерные ультрафиолетовые короткие импульсы в сторону моря, находясь на носу судна. Лидар должен обладать системой сканирования приемо-передающего оптического модуля в направлении, перпендикулярном курсу судна с азимутальным углом сканирования 120°, что обеспечивает поперечную развертку и полосу обзора для поиска мусора шириной 10-50 метров, в зависимости от высоты носа судна над водой. Продольную развертку квазиизображения обеспечивает поступательный ход судна. Сложность реализации поставленной задачи определяет тот факт, что в случае попадания лазерного импульса в мусор, находящийся на поверхности моря или в пределах метровой глубины из-за морского волнения, распознавание отклика зондируемой среды и решение вода-мусор должно быть принято на основе единственного лазерного импульса. При этом есть множество факторов, влияющих на оптический эхо-сигнал при лазерной локации морской среды, как то: пена или пузырьки в воде из-за обрушения волн или других процессов; морское волнение и изменчивый профиль поверхности, что ведет к переменным потерям на отражение лазерного пучка от границы раздела сред воздух-вода и искажение траектории лазерного луча в воде; переменная дистанция локации из-за качки судна, что приводит зачастую к некорректной работе приемной оптической системы; содержание в морской воде высоких концентраций ООВ или взвеси, органических пленок на поверхности, в том числе нефтепродуктов, а также водорослей, травы, листьев и других предметов природного происхождения, не являющихся мусором. Список негативных факторов можно было бы продолжить, однако ограничимся самыми часто встречающимися.

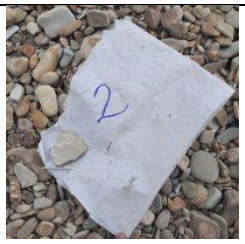
В качестве ключевой компоненты разработанного коллективом алгоритма обнаружения плавающего мусора в ВКС является использование очевидного факта отсутствия сигнала рамановского (комбинационного) рассеяния (КР), формирующегося непосредственно на молекулах воды при воздействии лазерного импульса, при попадании лазером по мусору, в принимаемом эхо-сигнале. К сожалению, данный критерий является идеальным при работе в открытых чистых морских водах, в которых сигнал КР может на порядок и больше превышать сигналы флуоресценции ОРОВ или хлорофилла. В прибрежных, пресных или загрязненных водах этот критерий не является универсальным из-за чрезвычайно широкого диапазона изменчивости спектров флуоресценции естественных вод, в зависимости от их загрязненности антропогенными веществами органической природы или минеральной взвесью. Спектр флуоресценции окрашенного органического вещества (ООВ) накладывается на спектр рамановского рассеяния при зондировании лазером с длиной волны 355 нм, и даже при полном отсутствии рамановского рассеяния сигнал флуоресценции ООВ может быть принят за него, что имело место быть во множестве случаев в ходе экспедиционных работ на северо-восточном черноморском шельфе. Для решения данной проблемы критерий распознавания мусора был дополнительно модифицирован для определения искажения спектра флуоресценции и рамановского рассеяния.

Кроме того, алгоритм детектирования был дополнен признаком, характерным для лазерного зондирования непрозрачных объектов, соответствующим значительному возрастанию сигнала обратного рассеяния лазерного излучения при практически полном исчезновении флуоресцентного отклика в соответствующих спектральных диапазонах (сравнительно с зондированием морской воды), с поправкой на наиболее частый случай ложных срабатываний при попадании лидаром по пене на поверхности моря. В совокупности данные условия ниже в тексте названы критерием #1, и он надежно работает в большинстве случаев для различных объектов, взвешенных в верхнем слое моря и находящихся на поверхности, применительно к северо-восточному шельфу Черного моря.

Особого внимания заслуживает широкий класс объектов, относящихся к морскому мусору, обладающими свойствами оптической прозрачности и одновременно высокой интенсивностью флуоресценции. Например, это прозрачная полиэтиленовая тара (бутылки и пр.), сделанные из ПВХ, ПЭТ или полистирола (таблица 1.5.1). Эхо-сигнал при лазерной локации таких объектов не удовлетворяет признакам критерия #1, описанного выше. Для распознавания таких объектов был введен критерий #2, который учитывает мгновенное максимальное возрастание эхо-сигналов в основных диапазонах,

регистрируемых лидаром, с учетом различий в спектрах флуоресценции для ПВХ, ПЭТ и полистирола. Этот доработанный критерий позволил с высокой достоверностью детектировать данные виды морского мусора.

Таблица 1.5.1 - Результаты валидации разработанной методики в ходе натурного эксперимента. Голубая бухта, сентябрь 2021 г.

№	Фото	Описание	Материал	Критерий #1	Критерий #2	Достоверность
1		пакет полупрозрачный	ПВХ Поливинил хлорид	+	-	99
2		пакет непрозрачный белый	ПВХ Поливинил хлорид	+	-	99
3		Крышка пластмассового ведра, плотная	ПП полипропилен	+	-	99
4		Одноразовая тарелка	ПВХ Поливинил хлорид	+	-	99
5		Стретч-пленка	Полистирол	+	-	99

6		Черный пакет п/прозрачный	Полистирол	+	-	90
7		Прозрачный полиэтиленовый пакет	Полистирол	+	-	97
8		Одноразовая тара	Вспененный ПВХ	+	-	98
9		Пластиковый стаканчик «Ролтон»	ПП полипропилен	+	-	99
10		Пакет TetraPak	С/РАР	+	-	99
11		Утеплитель/ уплотнитель	Пенополиэтилен	+	-	95
12		Одноразовая тара, черная непрозрачная тарелка	ПЭТ Полиэтилен терефталат	+	-	95

13		Пластиковая бутылка из-под воды, 1.5 л	ПЭТ Полиэтилен терефталат	-	+	90
14		Пластиковая баклажка, 5 л	ПЭТ Полиэтилен терефталат	-	+	90
15		Пластиковая бутылка окраш	ПЭТ Полиэтилен терефталат	-	+	80
16		Банка ал.	Al	+	-	99
17		Пенопласт	ПС пенополистирол	+	-	99
18		Пластиковый стакан, Турция	Полистирол	+	-	96
19		Аэрозольный баллон, Турция	Al окраш.	+	-	98

20		Пластиковый флакон	HDPE ПЭ высокой плотности	+	-	96
21		Пластиковый флакон	HDPE ПЭ высокой плотности	+	-	98
22		Утеплитель/ уплотнитель	Вспененный ПЭ низкой плотности	+	-	96
23		Палубная доска	Дерево окраш.	+	-	98
24		Доска	Дерево	+	-	98
25		Веревка. Общая группа материалов с рыболовными и промысловыми тралами	Капрон	+	-	99

Как уже отмечалось выше, пена, а также пузырьки в воде, образующиеся при обрушении волн, при работах с борта судна регулярно попадают в поле зрения лидара и вызывают резкое увеличение сигнала упругого рассеяния. Данный факт, к сожалению, делает невозможным использование этого сигнала в качестве маркера любого плавающего объекта, отличного от воды. Однако в ходе проверочных экспериментов нам удалось

установить различия спектров эхо-сигналов при локации мусора и пены, что позволило их надежно различить.

В целях валидации разработанной методики автоматического детектирования морского мусора средствами активного лидарного зондирования была проведена серия натурных экспериментов в ходе экспедиции в г. Геленджик на акватории Черного моря. Так как в принимаемом лидаром эхо-сигнале при локации мусора участвует морская вода, а точнее, значительный по толщине верхний слой моря (до 5 м в случае вод открытого моря), в лаборатории смоделировать подобные условия невозможно.

Описание натурного эксперимента

Для отработки, апробации и валидации разработанной методики использовался ультрафиолетовый флуоресцентный лидар УФЛ-9, установленный на борту МНИС «Ашамба» (рисунок 1.5.1). Судно было пришвартовано к причалу, лидар направлен под углом 30° к вертикали на поверхность моря, глубина в точке работ составляла более 6 м. Для помещения образцов морского мусора на поверхность моря в точке входа лазерного луча в воду использовалась надувная лодка, закрепленная между судном и причалом. Образцы помещались вручную как на поверхность, так и на различные горизонты (5, 10, >20 см) ниже поверхности моря. Выбор образцов мусора для экспериментов производился произвольно из соображений здравого смысла, однако при отборе предпочтение было отдано тем образцам, которые удалось обнаружить на берегу Черного моря вблизи Голубой бухты, выброшенным штормами в заплесковую зону.

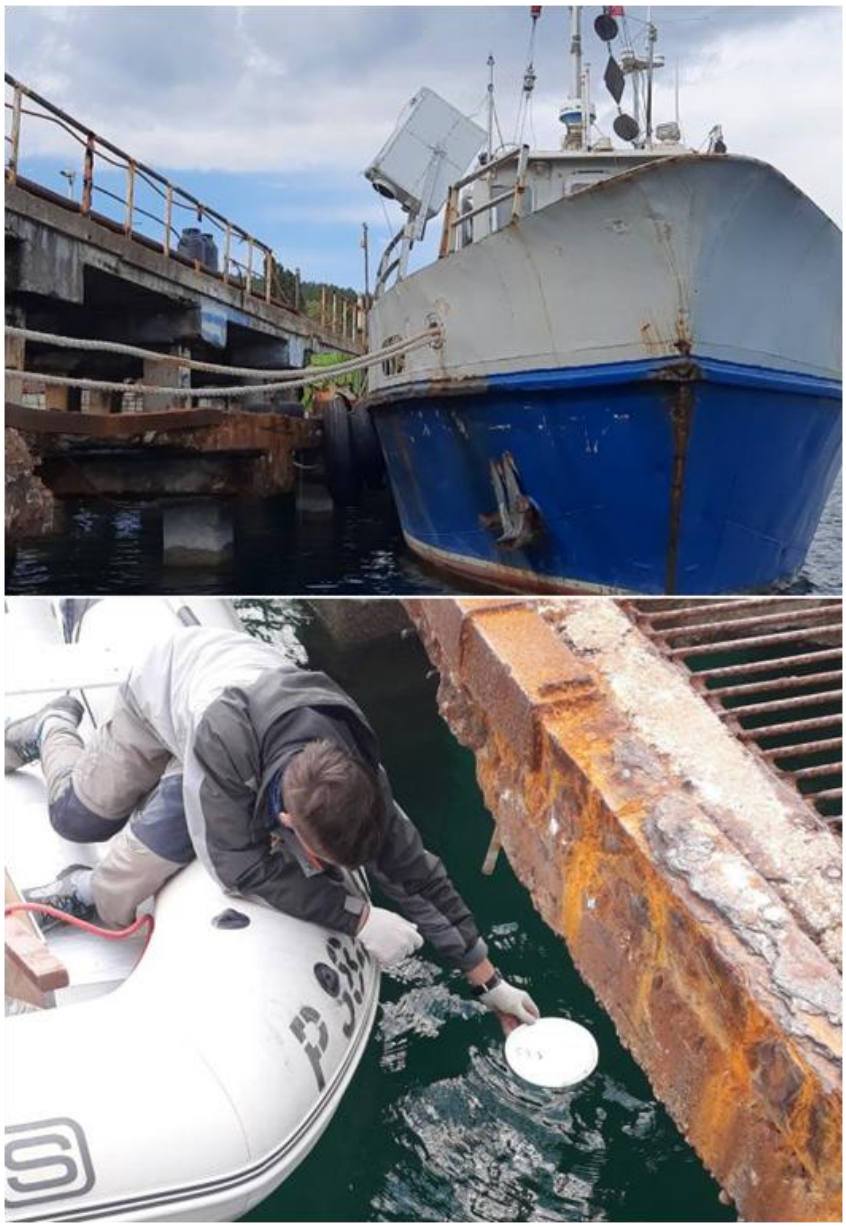


Рисунок 1.5.1 – Натурный эксперимент по валидации разработанной методики дистанционного автоматического обнаружения пластикового мусора лазерным лидаром с борта судна

Метод валидируют, когда необходимо убедиться в том, что его характеристики подходят для конкретного применения. Например, в п. 5.4.5.2 ISO/IEC 17025 [ISO/IEC 17025:2005] указано, что лаборатория должна валидировать нестандартные методы или методы, созданные/разработанные в лаборатории, в том числе, определить граничные условия их применения.

По результатам валидации метода установлено, что метод применим для автоматического дистанционного обнаружения морского пластикового мусора с помощью лазерного флуоресцентного лидара, достоверность обнаружения при попадании лазером в искомый объект в среднем составляет 92%.

Выявлены ограничения и важные условия применения разработанного метода:

1. Требуется использовать моностатическую схему организации лазерного зондирования (лазер-приемная оптическая система), для получения максимально стабильных сигналов при изменении угла входа лазерного пучка в воду и дистанции локации, при неизбежной в морских условиях судовой качке. В связи с тем, что согласно поставленной задаче требуется надежно детектировать мусор с единственного лазерного импульса, отсутствует возможность усреднения пачки сигналов и уменьшения дисперсии полезного сигнала.

2. Волнение более 3 баллов. Значительное волнение, а также наличие аэрозолей в воздухе из-за сильного ветра значительно увеличивает дисперсию полезного сигнала и увеличивает количество ложных срабатываний критерия детектирования мусора.

3. Низкая частота зондирований и угловая зона покрытия морской поверхности. В связи с необходимостью экстраполяции полученных данных о морском мусоре вдоль трека судна на всю акваторию, а также с необходимостью учета скважности лидарных импульсов, достоверность и надежность разработанного метода увеличивается при использовании высокочастотных лидарных систем, а также пространственного сканирования для расширения полосы обзора акватории. Подобные лидарные морские системы в настоящее время находятся в стадии разработки и смогут успешно применяться для детектирования морского мусора в ВКС моря и на его поверхности.

4. Разработанный метод адаптирован под лидар УФЛ-9, в котором в режиме разреза одновременно используются 4 спектральных канала (355, 404, 440, 685 нм), не позволяет уверенно различить между собой пластиковый и деревянный мусор. Серия натурных экспериментов дала основания предложить заменить длинноволновый канал 685 нм (или добавить еще один спектральный канал) на более коротковолновый, с длиной волны пропускания вблизи 550 нм, что позволит надёжно различить флуоресцентный отклик от дерева и пластика.

Модифицированная и адаптированная под северо-восточный черноморский шельф методика была применена для анализа данных лидарного зондирования на акватории Черного моря вблизи Керченского пролива, работы проводились в период 9-11 августа 2021 г. с борта МНИС «Пеленг». Данный район имеет сложную гидрологическую структуру и изменчивый во времени паттерн течений, что обусловлено смешением азовоморских и черноморских вод при переменном ветровом форсинге. Применительно к поставленной задаче обнаружения морского мусора в верхнем слое моря акватория Керченского пролива удобна вследствие высокой антропогенной нагрузки, как на

Черноморском побережье (районы вблизи г. Керчь и п. Кавказ), так и со стороны Азовского моря и стока реки Дон, несущего большое количество мусора, попадающего в том числе и в Черное море через пролив.

Из анализа данных за все дни экспедиции с помощью разработанной методики следует, что в зависимости от погодных условий плотность мусора в поверхностном слое составляет в среднем 95 ед/км^2, с пиковыми значениями до 1100 ед/км^2 по данным экстраполяции, результаты которой в значительной степени определяются выбранным методом аппроксимации. На рисунок 1.5.2 представлена карта распределения взвеси в верхнем слое моря, а также отмечены точки обнаружения мусора. Из распределения видно, что в зонах с высокими концентрациями взвеси мусора немного, и в целом корреляция концентраций мусора и взвеси отсутствует, что дополнительно подтверждает применимость разработанного критерия и его корректность в использовании сигналов обратного рассеяния. Также из распределения следует, что мусор скапливается преимущественно в центральной части пролива, что, по-видимому, обусловлено его большей концентрацией в азовоморских водах, поступающих в исследуемую акваторию с севера.

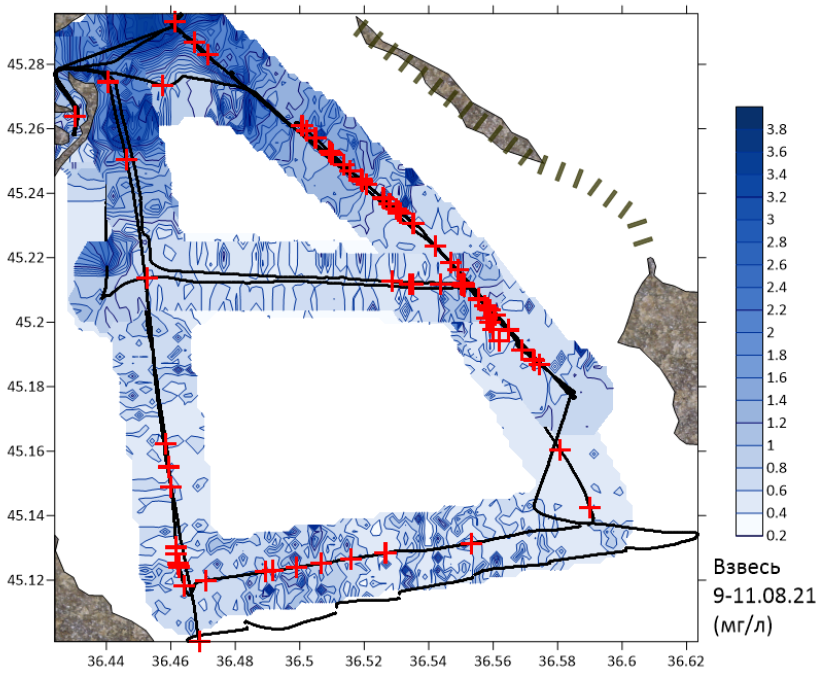


Рисунок 1.5.2 – Распределение взвеси в верхнем слое моря на акватории Керченского пролива по данным лидара УФЛ-9. Красными квадратами показаны точки срабатывания критерия детектирования морского мусора

Выводы к разделу 1.5.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ К РАЗДЕЛУ 1.5

Bellou, N., Gambardella, C., Karantzalos, K. et al. Global assessment of innovative solutions to tackle marine litter. Nat Sustain 4, 516–524 (2021). https://doi.org/10.1038/s41893-021-00726-2

Laufkötter, C. et al. M. Marine plastic waste input between 1990-2015 and potential beaching scenarios. In Proc. EGU General Assembly 2020, EGU2020-18476 (2020); https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-18476

Agamuthu, P., Mehran, S., Norkhairah, A. & Norkhairiyah, A. Marine debris: a review of impacts and global initiatives. Waste Manag. Res. 37, 987–1002 (2019).

Eriksen, M. et al. Plastic pollution in the world's oceans: more than 5 trillion plastic pieces weighing over 250,000 tons afloat at sea. PLoS ONE 9, e111913 (2014).

Palmer S.C.J., Pelevin V.V., Goncharenko I., et al. Ultraviolet fluorescence LiDAR (UFL) as a measurement tool for water quality parameters in turbid lake conditions // Remote Sensing. 2013. V. 5. № 9. P. 4405-4422.

Якушкин Л.Е., Пелевин В.В., Завьялов П.О. Использование флуоресцентного лазерного зондирования для обнаружения морского мусора, взвешенного в приповерхностном слое // Комплексные исследования Мирового океана: Материалы VI Всероссийской научной конференции молодых ученых, Москва, 18–24 апреля 2021 года. – Москва: Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук, 2021. – С. 494-495.

ISO/IEC 17025:2005 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories, ISO Geneva.

1.6 Многолетнее потепление вод в северо-восточном секторе Черного моря по данным судового мониторинга и буев Argo

К настоящему времени устойчивый тренд потепления вод Черного моря выявлен и описан в слое вод до глубины ~300 м. Отметим, что потепление сопровождается изменениями в гидрохимических и биологических процессах. В период между 1955 и 2015 гг. поступление кислорода в воды Черного моря сократилось на 44%, а глубина проникновения кислорода в толщу вод в среднем для всего бассейна сократилась с 140 до 90 м [Capet et al., 2016]. При этом значительно сократилась популяция анчоусов – наиболее важного вида для рыболовства в Черном море [Sakalli and Başusta, 2018].

Поэтому результаты дальнейших исследований климатических трендов в водной толще Черного моря могут иметь важное значение не только для фундаментальной, но и прикладной науки.

Продолжение судового мониторинга в 2021-2022 гг.

Мониторинговые работы на 9-мильном разрезе на траверзе Голубой бухты были продолжены в 2022 г. с помощью CTD-зонда SBE 19Plus, установленного на гидрофизический комплекс SBE55 (рисунок 1.6.1). Помимо этого, с середины октября 2021 г. до 24 мая 2022 г. проводились измерения гидрофизических параметров заякоренным мобильным профилирующим аппаратом «Аквалог» над континентальным склоном на траверзе Геленджикской бухты.

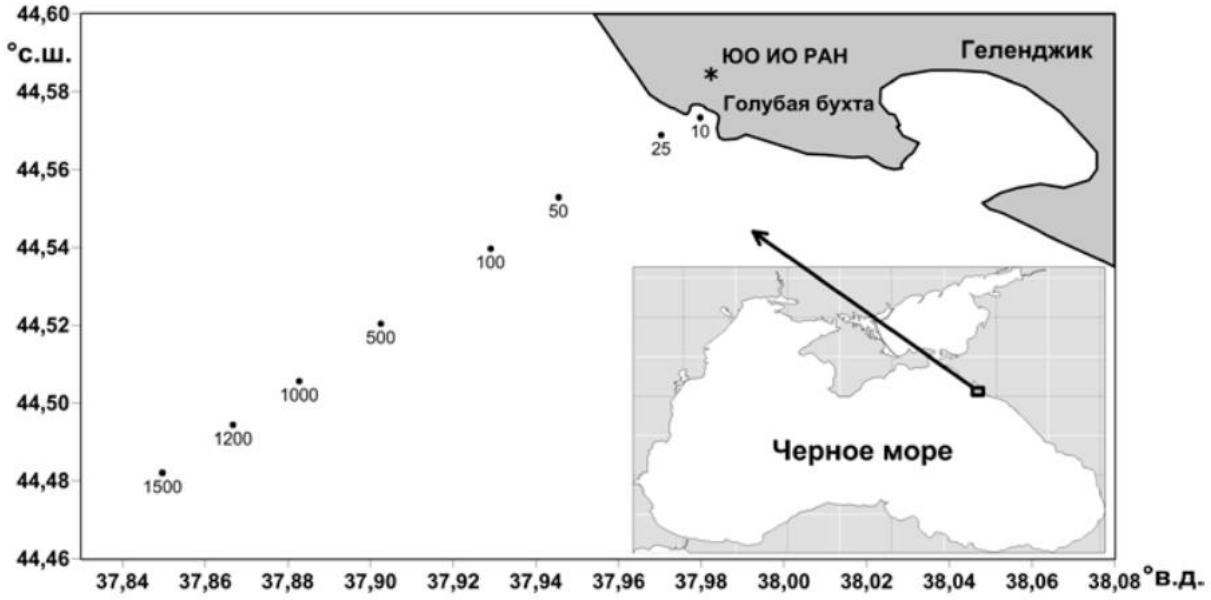


Рисунок 1.6.1 – Район проведения многолетнего мониторинга в северо-восточной части Черного моря. Цифрами на схеме показана максимальная глубина в точках выполнения станций. [Подымов и др., 2021].

Анализ полученных данных показал, что, как и в предыдущие 4 года, ХПС в своем классическом определении практически отсутствовал. Анализ данных Аквалога показал, что первый приток свежей холодной воды в слой 90 – 140 м наблюдался 21 марта 2022 г. Однако этот заток был перемешан в течение суток и следующее поступление холодной воды произошло уже в начале апреля в довольно обширном слое 60 – 150 м. До завершения периода работы Аквалога наблюдалось поступление холодных вод в слое до 120 м и, судя по данным мониторинга, где были отмечены небольшие слои воды с температурой ниже 8°С, продолжалось до конца июня (рисунок 1.6.2). Полученные данные позволяют сказать, что ХПС как феномен продолжил свое существование в 2022 г., однако его современные границы проходят по изотермам 8.8 °С.

Рост температуры в слоях, расположенных ниже условного ХПС, в 2021-2022 гг. продолжил тренд предыдущих 12 лет. За последний год нижняя изотерма 8,8 °С поднялась почти на 100 м, выйдя из глубинных слоев (рисунок 1.6.3). Необходимо отметить, что выраженное потепление на глубинах 100-250 м нельзя объяснить влиянием атмосферных процессов, поскольку поверхностные воды отделены от глубинных холодным промежуточным слоем. Наиболее вероятной причиной наблюдаемого потепления является воздействие притока босфорских вод, распространяющихся в восточный сектор моря с Основным Черноморским течением в слое 150-600 м [Falina et al., 2017].

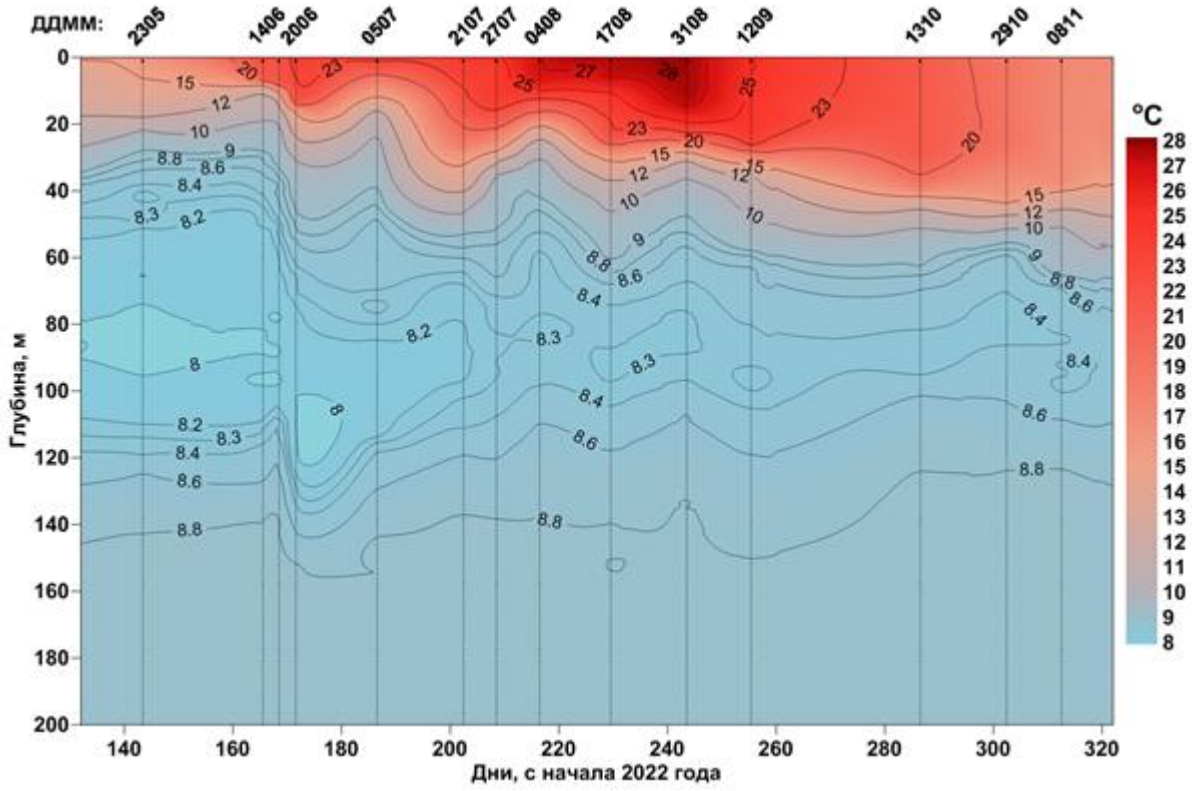


Рисунок 1.6.2 – Годовой ход температуры воды на срединной точке 9-мильного разреза над глубиной 500 м в 2022 г.

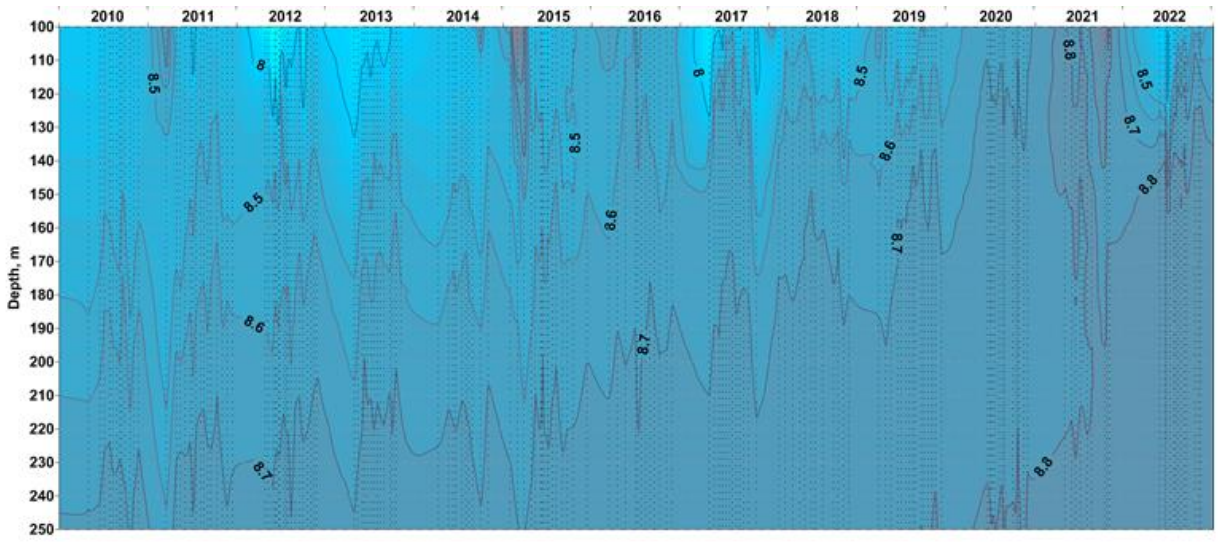


Рисунок 1.6.3 – Динамика роста температуры (°C) в зоне ядра условного ХПС и ниже за период с 2010 по 2022 гг. по данным наблюдений на срединной станции разреза над глубиной 500 м.

Регион исследования и используемые данные буев Argo.

Ключевым элементом системы оперативного гидрофизического мониторинга в Черном море являются наблюдения с помощью дрейфующих буев-профилемеров в рамках программы Argo. С 2002 года буи Argo непрерывно, в режиме реального времени предоставляют *in situ* данные о температуре и солености в толще вод от поверхности моря до глубин 1500 м по всей площади бассейна. Схема рабочего цикла буя Argo приведена на рисунок 1.6.4. При этом количество данных, получаемых с помощью буев Argo в целом для Черного моря, растет с каждым годом.

В рамках проекта для исследования был выбран северо-восточный сектор Черного моря (к востоку от 35° в.д., к северу от 42,5° с.ш. – см. рисунок 1.6.5б). Данный регион охватывает российские прибрежные воды от Керчи на севере до Адлера на юге, а также прибрежную зону Абхазии. Для исследования использованы все данные CTD-зондирований, полученные 32-мя буями Argo с января 2005 года по декабрь 2021 года (см. Табл. 1). Данные были получены из международной базы данных Coriolis (https://fleetmonitoring.euro-argo.eu). Распределение количества буев и количества зондирований по годам приведено на рисунок 1.6.5а. Технические характеристики (изобара дрейфа, максимальная изобара профилирования, продолжительность одного цикла и др.) приведены в Таблице 1.6.1. Совокупное количество анализируемых профилей (более 1900) определяет значительные преимущества данных Argo для решения задач настоящего проекта по сравнению с данными отдельных судовых съемок в регионе.

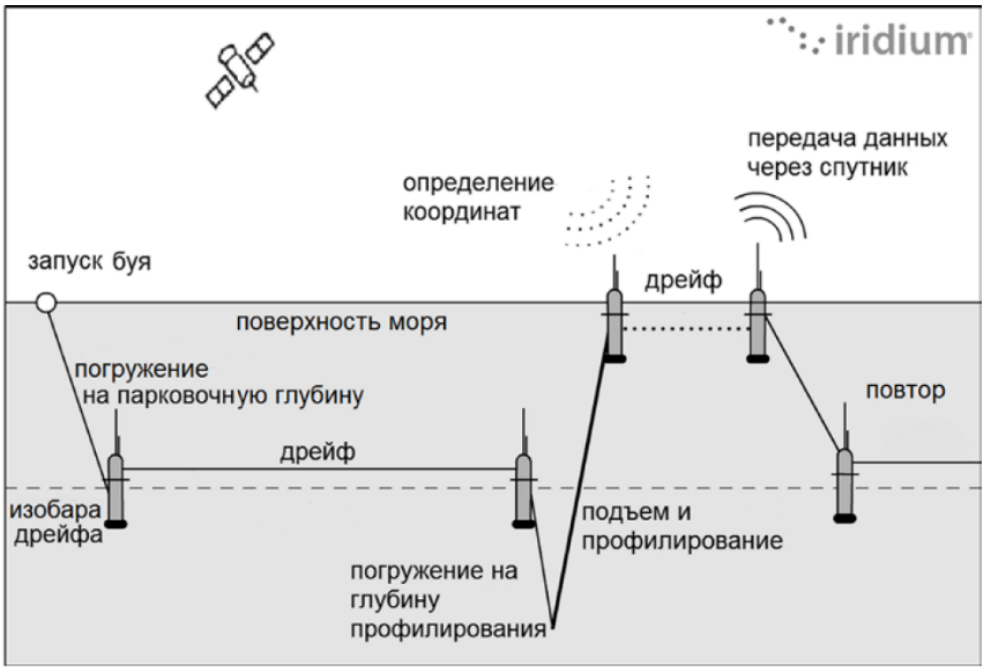


Рисунок 1.6.4 – Схема рабочего цикла дрейфующего буя Argo (из работы [Маркова, Багаев, 2016]).

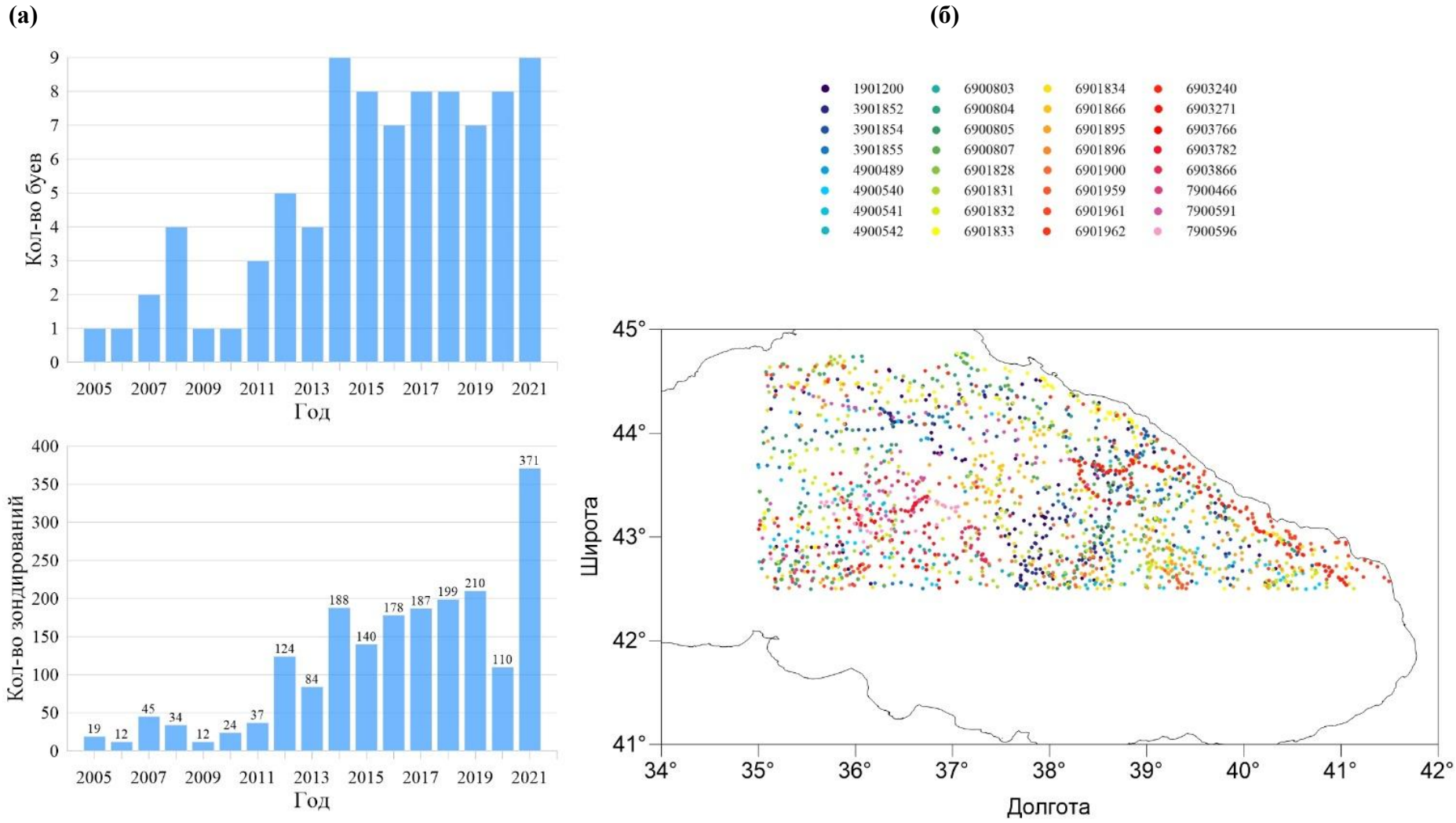


Рисунок 1.6.5 – (а) Распределение по годам количества буев Argo и количества проведенных буями зондирований в северо-восточном секторе Черного моря в период 2005-2021 гг. (б) точки, в которых были проведены зондирования 32-мя буями Argo в 2005-2021 гг. в регионе исследования (номера буев приведены в легенде в верхней части рисунка).

Таблица 1.6.1 – Перечень и характеристики буев Argo, проводивших профилирования в северо-восточном секторе Черного моря в 2005-2021 гг.

№	Номер буя Argo	Дата начала работы	Дата окончания работы	Изобара дрейфа	Продолжительность цикла (в часах)	Максимал. изобара профилирования
1	1901200	08.12.2009	23.02.2013	200	120	1500/700
2	3901852	06.12.2016	по наст. время	200	120	1500/700
3	3901854	02.11.2016	по наст. время	200	120	1500/700
4	3901855	22.10.2016	по наст. время	200	120	1500/700
5	4900489	07.03.2005	18.01.2009	1500	146	1550
6	4900540	07.03.2005	02.10.2008	1500	146	1550
7	4900541	12.06.2006	01.03.2009	1500	146	1550
8	4900542	12.06.2006	23.12.2009	1500	146	1550
9	6900803	18.03.2011	18.10.2017	750	120	1500/750
10	6900804	18.03.2011	01.07.2013	750	120	1500/750
11	6900805	19.03.2011	12.11.2016	750	120	1500/750
12	6900807	28.11.2014	08.09.2018	200	120	1000
13	6901828	29.09.2013	24.08.2014	200	120	1500/700
14	6901831	18.07.2014	21.11.2019	200	120	1500/700
15	6901832	12.09.2014	16.03.2020	200	120	1500/700
16	6901833	01.06.2016	19.03.2021	200	120	1500/700
17	6901834	25.11.2015	04.04.2021	200	120	1500/700
18	6901866	27.05.2015	07.07.2019	200	120	1000
19	6901895	02.08.2013	26.01.2017	750	120	750
20	6901896	04.08.2013	05.10.2014	200	120	750
21	6901900	02.05.2014	22.07.2016	200	120	1000
22	6901959	08.06.2012	21.04.2015	200	120	1500
23	6901961	06.11.2012	19.09.2015	200	120	1500
24	6901962	17.08.2012	20.07.2015	200	120	1500
25	6903240	29.03.2018	по наст. время	1000	24/120	1000
26	6903271	01.10.2019	по наст. время	50/150/1000	1-120	150/1000
27	6903766	02.12.2019	по наст. время	200	120	1500
28	6903782	23.07.2020	по наст. время	200	120	1500
29	6903866	22.11.2020	по наст. время	750	120	1500
30	7900466	07.05.2010	27.11.2012	450	120	500
31	7900591	16.12.2013	20.02.2020	1000	24/120/240	1000
32	7900596	05.12.2019	по наст. время	1000	240	2000

Выраженный тренд потепления вод на глубинах ~150-700 м по данным буев Argo

На рисунок 1.6.6 приведены θ,S-диаграммы, построенные на основе данных профилирований буями Argo в северо-восточном секторе Черного моря в 2005-2021 гг. На рисунок 1.6.6 (слева) видно, что процесс увеличения температуры в слое ХПС ($14<\sigma_0<15.4$) шел поступательно с двумя перерывами, обусловленными холодными зимами 2011/12 и 2016/17 годов (см. также [Подымов и др., 2021]). В эти зимы, также, как и в начале периода наблюдений, формировался ХПС с температурой менее 8°С (см. также рисунок 1.6.3).

Однако, в слое вод под ХПС на глубинах ~150-700 м потепление вод носило непрерывный поступательный характер, начиная с 2009-2010 гг. (см. рисунок 1.6.6, справа). В 2005-2007 гг. в северо-восточном секторе моря аномалий температуры, связанных с линзами босфорских вод, отмечено не было, поэтому θ,S-профили фактически ложатся в одну линию. В 2008 году в восточном секторе моря на основе данных Argo было зафиксировано проникновение босфорских вод с положительными аномалиями температуры между изопикнами (σ_0) 15,8 и 17,1 (см. [Falina et al., 2017]). В последующие годы, видимо, количество и величина положительных температурных аномалий возрастали. Этим можно объяснить широкий диапазон значений температуры для отдельно взятых периодов (показанных разными цветами на θ,S-диаграммах). Кроме этого, видимо, наблюдался накопительный эффект: потепление толщи вод за счет ранее поступивших и диссипирующих линз с каждым годом усиливалось благодаря поступлению новых линз босфорской воды.

Наиболее выраженный эффект от проникновения теплых босфорских линз зафиксирован в 2020 и 2021 гг. На рисунок 1.6.6 (справа) и рисунок 1.6.7 (слева) видно, что выраженные температурные аномалии наблюдались в широком диапазоне глубин – от 150 до 700 м. При этом в 2021 году впервые за все время наблюдений буй Argo дважды зафиксировал проникновение в северо-восточный сектор моря линзы с аномально высокой температурой (с аномалией температуры >0,3°С) и соленостью (см. текст ниже и рисунок 1.6.9).

В рамках настоящего отчета не затронута еще одна тенденция, о которой можно судить на основе рисунков 1.6.6 и 1.6.7. В 2019-2021 гг. произошло значительное увеличение солености в слое вод под ХПС вплоть до 1500 м (нижней границы измерений буями Argo). Наиболее вероятная причина данной тенденции – приток вод босфорского происхождения, сохранивших положительные аномалии солености в процессе распространения. Однако, и тенденция, и ее причины требуют дальнейших исследований с использованием данных Argo 2022-2023 гг.

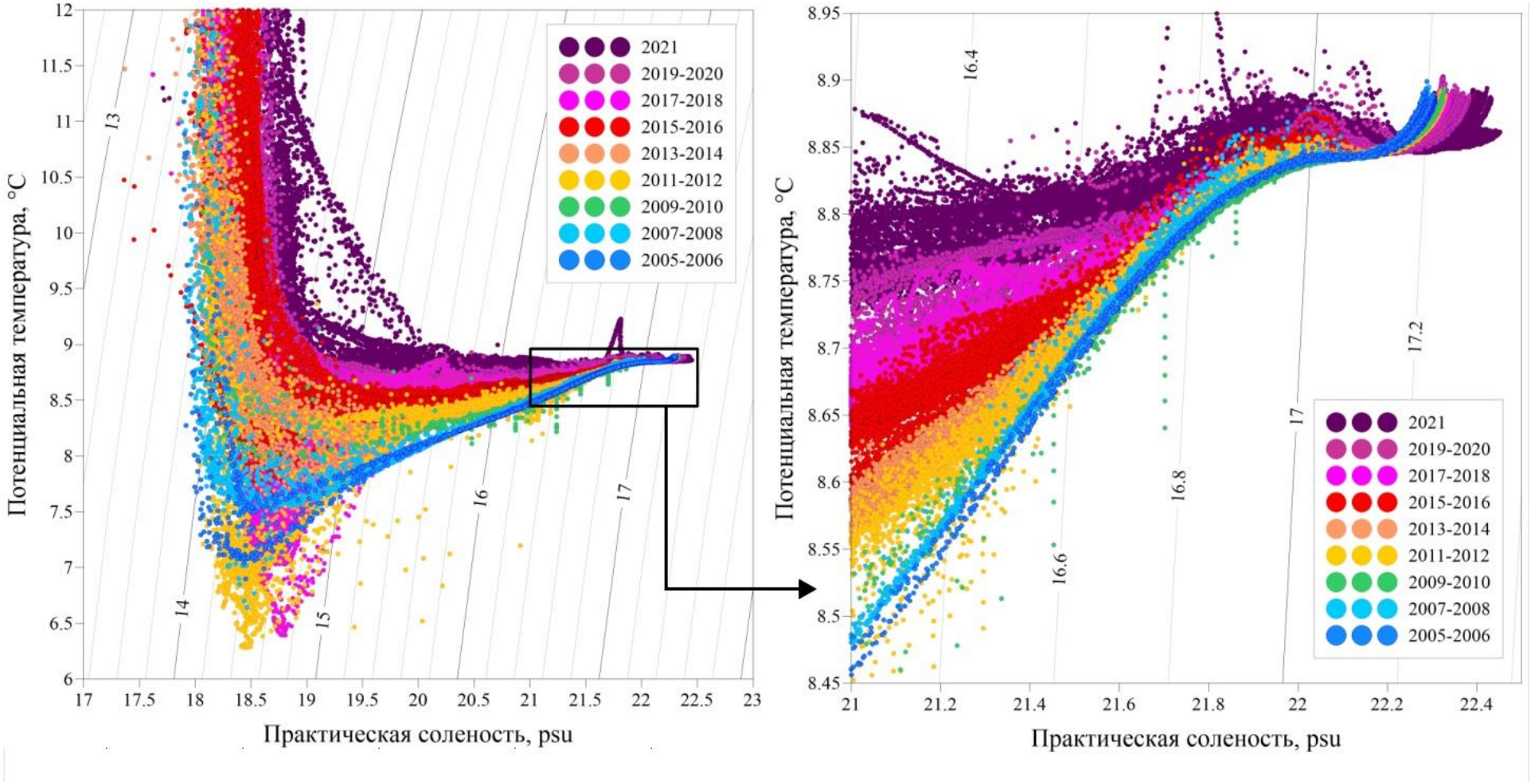


Рисунок 1.6.6 – θ,S-диаграммы, построенные на основе данных профилирований буями Argo в северо-восточном секторе Черного моря в 2005-2021 гг. Диаграмма справа – часть диаграммы слева, обозначенная черным прямоугольником. Рисунок иллюстрирует последовательное потепление вод в слое вод под ХПС.

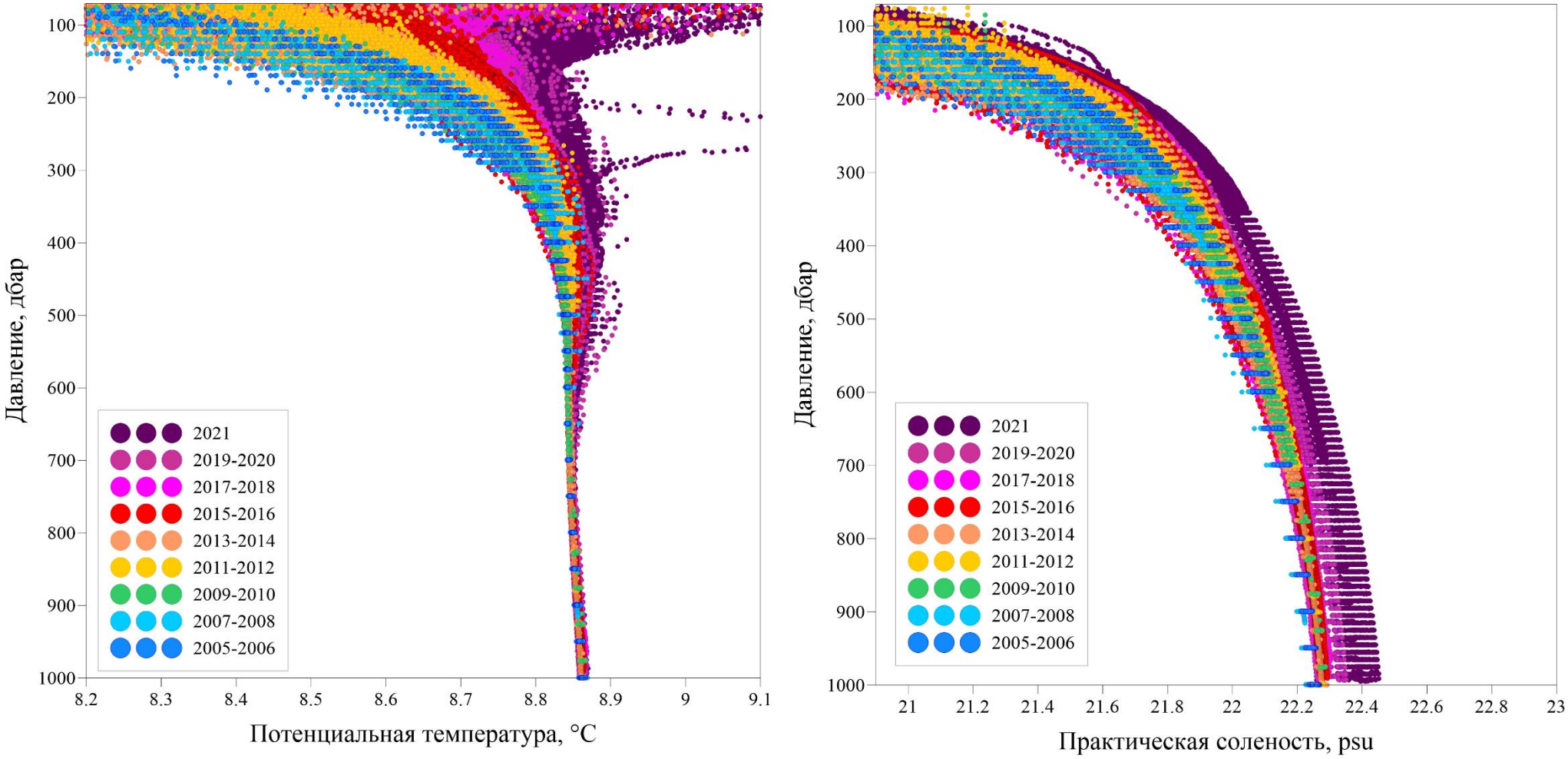


Рисунок 1.6.7 – Профили температуры и солености, построенные на основе данных профилирований буями Argo в северо-восточном секторе Черного моря в 2005-2021 гг. Использована та же цветовая шкала, что и на Рис. 6.

Причина многолетнего потепления: воздействие притока босфорских вод

На основе анализа данных Argo, полученных в северо-восточном секторе Черного моря в 2005-2021 гг., можно сделать предварительное заключение, что наиболее вероятной причиной последовательного потепления вод на глубинах 150-700 м является увеличение влияния босфорских вод. Далее рассмотрим более подробно, могли ли линзы босфорских вод распространяться в исследуемый регион в 2010-2021 гг., сохраняя при этом повышенную температуру и соленость.

Присутствие вод босфорского (средиземноморского) происхождения в восточном бассейне Черного моря было впервые зафиксировано на основе данных экспедиционных наблюдений в 2002 году [Falina et al., 2007]. Линзы, обладающие аномалией температуры величиной до 0.06°C, были обнаружены в центре восточного круговорота на глубинах 170-500 м. Это впервые позволило предположить, что распространение босфорских линз с выраженными характеристиками охватывает не только прибосфорский регион, но и большую часть акватории моря.

Это предположение было в полной мере подтверждено спустя 10 лет. На основе данных Argo и данных российских/турецких судовых наблюдений, полученных в 2005-2009 гг., было зафиксировано распространение босфорских линз в восточный сектор моря. При этом основным «проводником» босфорских вод выступила южная ветвь Основного Черноморского течения, зимняя интенсификация которого способствует быстрому (в течение нескольких месяцев) распространению этих вод. Также удалось выявить механизм, определяющий интенсивность и пределы распространения вод средиземноморского происхождения в Черном море, и оценить время «добегания» этих вод до различных районов моря. Было показано, что прохождение сильных (аномально «глубоких») циклонов над проливом Босфор в северо-восточном направлении вызывает интенсивные вбросы босфорских вод, а также их масштабное распространение в промежуточном слое Черного моря на глубинах 150-600 м [Falina et al., 2017].

Чтобы удостовериться, что в последующие годы (*после 2009 года*) процесс переноса босфорских линз с ОЧТ в восточный бассейн моря не прекратился и мог стать фактором, определяющим значительное поступательное потепление вод на глубинах 100-700 м в исследуемом регионе, в анализ были включены профили буев Argo, полученные в ОЧТ после 2010 года (см. рисунок 1.6.8). Из всего массива данных были выбраны профили, имеющие наиболее четкие, выраженные аномалии по температуре.

Отбор и анализ профилей, показал, что перенос теплых интрузий из прибосфорского региона в восточный сектор моря с Основным черноморским течением продолжался после 2010 года. Температурные аномалии на глубинах 90-650 м были зафиксированы по всей протяженности южной ветви ОЧТ (рисунок 1.6.8).

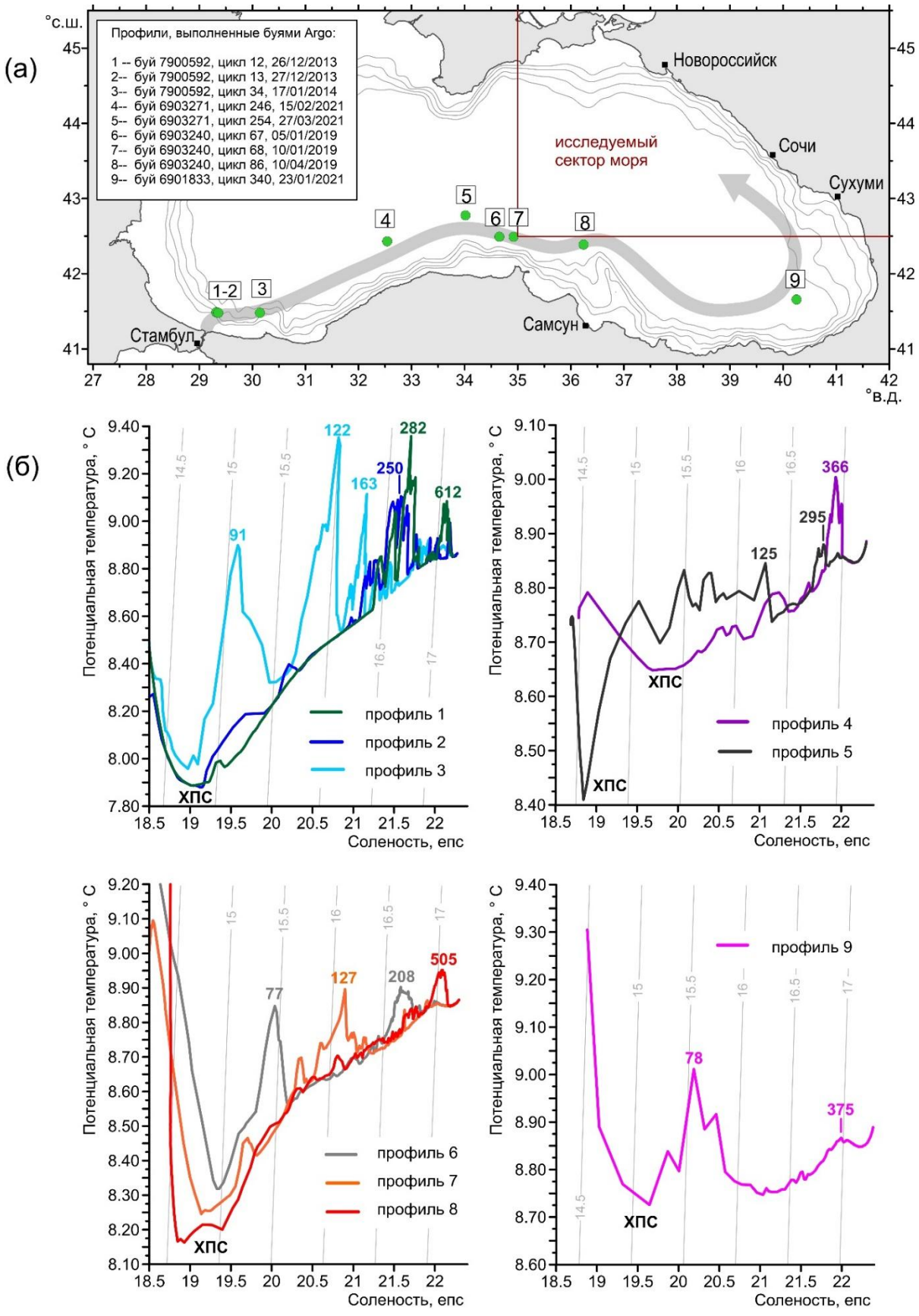


Рисунок 1.6.8 – Положение точек вдоль ОЧТ (схематично показано серой стрелкой), в которых были выполнены профилирования буями Argo (см. легенду) и зафиксированы значительные по величине аномалии температуры. (б) T,S-диаграммы, построенные на основе данных профилирований буями Argo вдоль ОЧТ. Цифрами указаны значения глубины, соответствующие максимальным значениям температуры в линзах босфорских вод.

Необходимо отметить, что наиболее значимые аномалии вдоль южной ветви ОЧТ наблюдаются с декабря по апрель. Это вполне закономерно, если учесть, что наиболее глубокие циклоны проходят над Босфором в ноябре-марте, а время «добегания» до восточного бассейна – несколько месяцев [Falina et al., 2017]. Однако, вопрос сезонности вброса босфорских вод в Черное море требует дальнейшего изучения атмосферных условий над Босфором и особенностей водообмена через пролив в 2010-2021 гг.

Несмотря на то, что профили были получены в зоне ОЧТ в разные годы, они указывают на интересный факт: величина положительных температурных аномалий в линзах в разы превышает величины, характерные для аномалий, зафиксированных во всем море в 2005-2009 гг. Из рисунка 2 в работе [Falina et al., 2017] видно, что максимальная величина положительных температурных аномалий ранее не превышала 0,18°C. Наблюдения после 2010 года (см. рисунок 1.6.8) говорят о том, в прибосфорском регионе величины аномалий достигали 0,8°C, в более восточных регионах – 0,35°C. Можно предположить, что изменение свойств босфорских линз, а именно увеличение температуры – *один из нескольких факторов*, определивших потепление промежуточных вод в северо-восточном секторе Черного моря после 2010 года.

Далее приведем доказательство того, что в северо-восточный сектор Черного моря в последние годы проникают линзы босфорских вод не только с аномально высокой температурой, но и соленостью.

В конце 2021 года буй Argo №6903866, дрейфующий на глубине около 750 м, находился в северо-восточном секторе моря, медленно перемещаясь в южном направлении внутри локального круговорота (рисунок 1.6.9а). С 25 октября по 19 декабря буй выполнил 12 зондирований водной толщи до глубины около 1500 м. На основе данных 10 из 12 профилирований было зафиксировано присутствие теплых интрузий с аномалиями температуры менее 0,1°C (при этом аномалии солености по величине были соизмеримы с точностью измерения данного параметра). Однако, зондирования, выполненные 29 ноября и 4 декабря, выявили присутствие на глубинах 200-350 м линзы с аномалией температуры >0,3°C и аномалией солености около 0,1 епс (рисунок 1.6.9в,г). Линза с такими большими по величине аномалиями температуры и солености впервые зафиксирована в северо-восточной части Черного моря. Тот факт, что линза зафиксирована по данным двух отдельных зондирований, исключает вероятность ошибки.

Безусловно, количество зондирований буями Argo в Черном море пока не позволяет построить детальную пространственную картину распространения босфорских интрузий для отдельно взятого года или проследить путь распространения отдельно взятой линзы от пролива Босфор до исследуемого региона. Однако, уже сейчас можно с уверенностью говорить о том, что многолетнее потепление вод под ХПС на глубинах 150-700 м обусловлено воздействием босфорских вод.

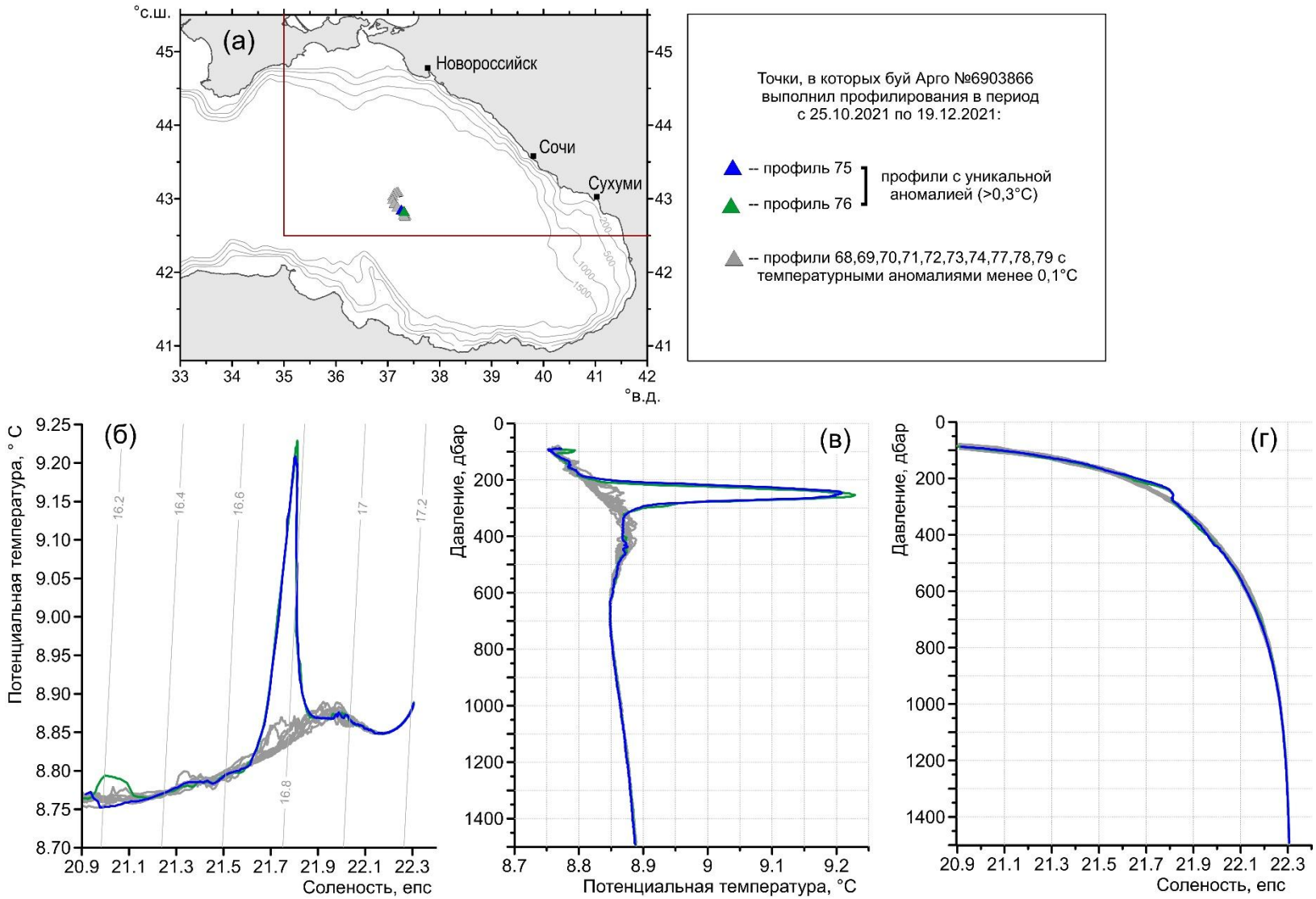


Рисунок 1.6.9 – (а) Положение станций, выполненных буем Argo №6903866 с 25.10.2021 по 19.12.2021 в северо-восточном секторе Черного моря. Цветными треугольниками показаны две станции, на которых была зафиксирована линза с аномально высокими температурой и соленостью. (б), (в), (г) T,S- диаграмма и графики распределения температуры и солености в поле давления, построенные на основе данных указанных профилирований.

Заключение

В рамках проекта было продолжено исследование термохалинного режима вод северо-восточного сектора Черного моря на основе данных судового мониторинга и обширного массива данных буев Argo.

Продолжение многолетнего судового мониторинга в прибрежных водах (около г. Геленджик) в 2021-2022 гг. позволило выявить две тенденции: (1) продолжение потепления вод в слое 100-250 м, начавшегося в 2010 г. и (2) подъем изотермы 8,8 °С почти на 100 м, что свидетельствует об интенсификации потепления в последние два года.

На основе данных буев Argo показано, что многолетнее непрерывное потепление в северо-восточном секторе Черного моря охватывает толщу вод на глубинах 150-700 м, т.е. весь слой, в котором распространяются и фиксируются интрузии босфорских вод. Температура босфорских линз в исследуемом регионе была значительно выше, чем температура линз, зафиксированных в Черном море до 2010 года. Предварительный анализ всего массива данных Argo, полученных в Черном море, говорит о том, что эта тенденция имеет место практически по всей акватории этого бассейна. Вопрос о причинах этого тренда в большой степени остается открытым. Помимо увеличения температуры босфорских линз по сравнению с 2005-2009 гг., к устойчивому потеплению промежуточных вод под ХПС могли способствовать еще несколько факторов: общее потепление верхних слоев моря, изменение пресноводного баланса и/или среднего уровня моря, увеличение объема вод, поступающих через пролив Босфор, интенсификация ОЧТ и т.д. Исследование каждого из этих факторов и их комбинации должно стать предметом дальнейших исследований в регионе.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ К РАЗДЕЛУ 1.6.

Маркова Н.В., Багаев А.В. Оценка скоростей глубоководных течений в Черном море по данным дрейфующих буев-профилемеров Argo // Морской гидрофизический журнал, 2016, №3, с. 26-39

Подымов О. И., Зацепин А. Г., Очередник В. В. Рост солености и температуры в деятельном слое северо-восточной части Черного моря с 2010 по 2020 год // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 3. С. 279–287. doi:10.22449/0233-7584-2021-3-279-287

Capet A., Stanev E.V., Beckers J., Murray J.W., Grégoire M. Decline of the Black Sea oxygen inventory // Biogeosciences, 2016, V.13, P. 1287–1297, doi:10.5194/bg-13-1287-2016

Falina, A., A. Sarafanov, and I. Volkov Warm intrusions in the intermediate layer (150–500 m) of the Black Sea eastern gyre interior // Geophys. Res. Lett., 2007, V.34, L22602, doi:10.1029/2007GL031016

Falina A.S., Sarafanov A.A., Ozsoy E., Turuncoglu U.U. Observed basin-wide propagation of Mediterranean water in the Black Sea // Journal of Geophysical Research, 2017, V. 122(4), doi:10.1002/2017JC012729

Sakalli A, Başusta N. Sea surface temperature change in the Black Sea under climate change: A simulation of the sea surface temperature up to 2100 // Int J Climatol. 2018;38:4687–4698. https://doi.org/10.1002/joc.5688

2 Валидация модифицированной модели BSAS12 и проведение с ее помощью численных экспериментов по воспроизведению мезомасштабной структуры циркуляции в российском секторе моря и переноса загрязнений в различных условиях атмосферного форсинга и материкового стока

В 2022 году в рамках выполнения данного проекта мы провели серию экспериментов с модифицированной численной моделью BSAS12.L59 с добавлением пассивных безмассовых трассеров. Цель экспериментов - оценить отклик акваторий Черного и Азовского морей на выпуск растворенных загрязняющих веществ в устье одной из крупных рек региона.

Суть численного эксперимента следующая: инициируется *холодный* запуск (запуск с начального условия по солёности и температуре и нулевого поля скоростей) и в течение 18 месяцев происходит *разгон* численной модели, для того чтоб скорости циркуляции вод вышли на типичные для данного бассейна величины; далее в устье реки Дон – Таганрогском заливе инициируется источник пассивных трассеров, моделирующих загрязняющие вещества. Нами была выбрана река Дон, поскольку она является крупнейшим источником пресных вод в Азовском море (до 70% годового континентального стока, Ilyin et. al. 2009). Область сброса загрязнителей указана на рисунке 2.1. На протяжении следующих 12 модельных месяцев происходит «сброс» трассеров в указанную область. На третьем этапе эксперимента прекращается выпуск трассеров в море и производятся измерения того, как быстро те или иные акватории избавляются от загрязнителей. Третий этап самый длительный и продолжается 15 лет. На протяжении данного этапа трёхмерные поля концентрации трассеров $\rho_{trc}(x, y, depth, t)$ выгружаются из модели, вычисляются и сохраняются их среднесуточные значения (рисунок 2.1). По окончании эксперимента производятся помесячные и годовые осреднения полученных полей $\rho_{trc}^{month}(x, y, depth, month)$,

$\rho_{trc}^{year}(x, y, depth, year)$ и далее производятся пространственные осреднения полученных полей по отдельным акваториям: $\rho_{trc\ Black\ Sea}^{month\ /\ year}(month/year)$, $\rho_{trc\ Azov\ Sea}^{month\ /year}(month/year)$, для Черного моря и Азовского моря соответственно. На текущем этапе выполнения проекта нами были проведены тестовые запуски модели для определения оптимальных параметров вышеописанного эксперимента, так были подобраны длительности каждой из 3 частей эксперимента, частота с которой сохраняются выходные данные и пр. После этого был произведен непосредственный численный расчет с 01.01.2000 по 31.12.2016.

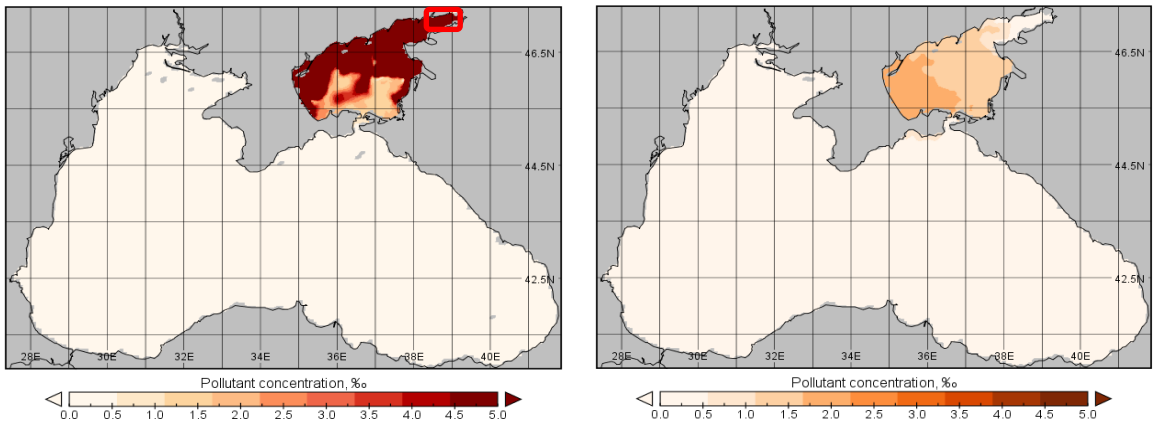


Рисунок 2.1 – Поля распределения концентрации загрязнителей ρ_{trc} в начале эксперимента 01.07.2001 (левая панель), в конце эксперимента 01.07.2016 (правая панель). Красным обозначена область источника трассеров

Результаты численного эксперимента. Проведенный численный эксперимент позволил понять, как Керченский пролив влияет на краткосрочные и долгосрочные потоки растворенных загрязняющих веществ из реки Дон в открытую часть Черного моря. Для этого мы построили и проанализировали временные ряды концентраций трассеров, для того чтобы на основании данных рядов сделать выводы о том в какие сроки и в какой степени происходит вынос загрязнителей из акваторий Азовского и Чёрного морей, какие районы указанных акваторий очищаются ранее других, а какие подвержены накоплению загрязняющих веществ. Изменение концентрации трассеров в Азовском море $\rho_{\text{trc Azov Sea}}^{\text{month }/year}$ по результатам моделирования представлены на рисунке 2.2 По очевидным причинам с июля 2001 года по июль 2002 происходит накопление трассеров в акватории Азовского моря, далее при «выключении» источника происходит резкое падение концентрации. Так за следующие 12 месяцев концентрация уменьшается практически в 3 раза. На значение среднемесячной концентрации в первый месяц «режима загрязнения» модель возвращается через 2.5 года. Через 6 лет концентрация падает в 10 раз по сравнению с пиковым значением, а к концу

моделирования декабрю 2016 года концентрация трассеров уменьшилась в 46 раз по сравнению с пиковым значением. Изменение концентрации трассеров в Азовском море при отсутствии источника можно аппроксимировать функцией $f(x) = Ce^{bx}$, где $C = 55.36,\ b = -0.0626.$

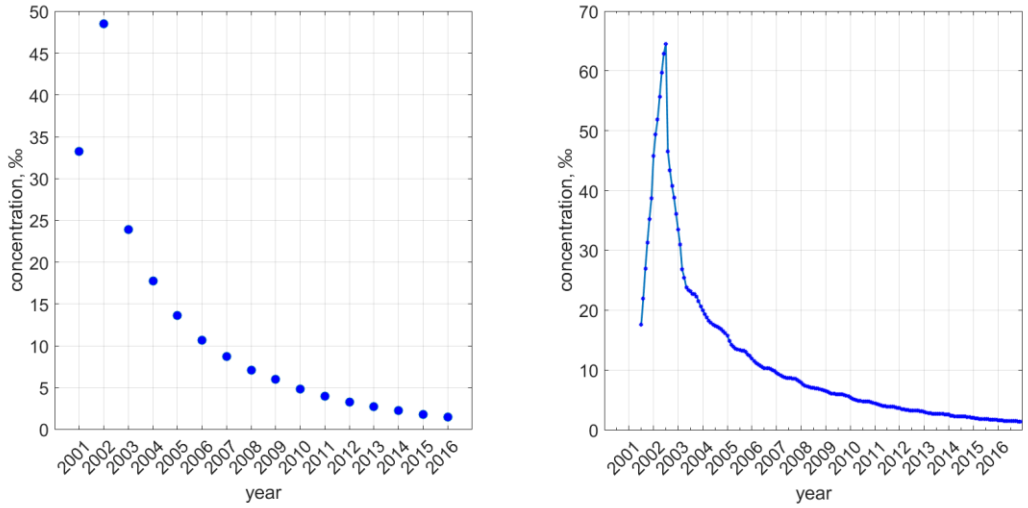


Рисунок 2.2 – Временные ряды концентрации загрязнителей в Азовском море $\rho^{\text{year}}_{\text{trc Azov Sea}}$ (левая панель), среднемесячной концентрации загрязнителей в Азовском море $\rho^{\text{month}}_{\text{trc Azov Sea}}$ (правая панель)

Изменения концентрации трассеров в Черном море $\rho^{\text{month}/year}_{\text{trc } Black \text{ Sea}}$ по результатам моделирования представлены на рисунке 2.3. В первые 12 месяцев моделирования существенных выносов трассеров в Черное море не наблюдается. Далее по мере поступления трассеров в Черное море происходит логарифмический рост концентрации аппроксимированный функцией $f(x) = a + b\log_{10} x$, где $a = 184,\quad b = 155.5$.

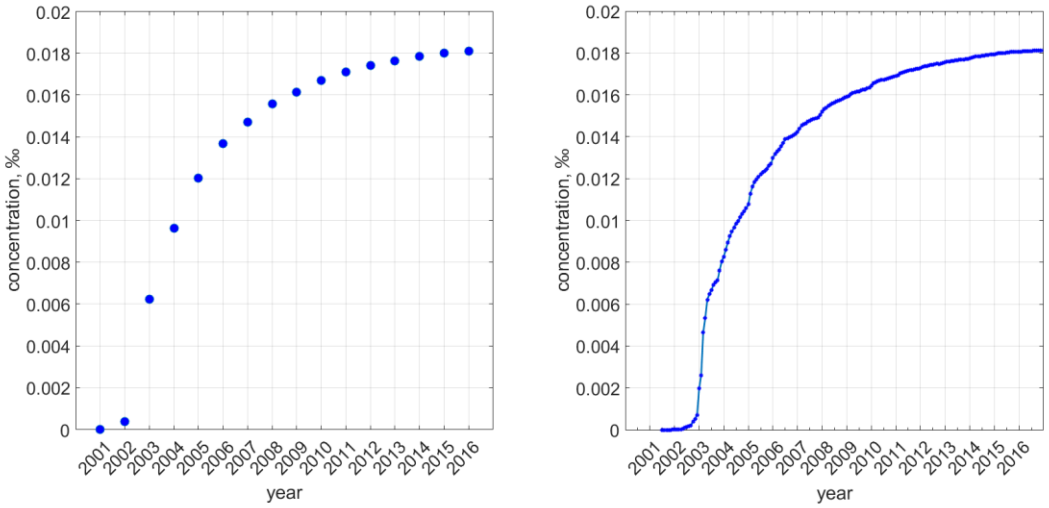


Рисунок 2.3 – Временные ряды концентрации загрязнителей в Черном море $\rho^{year}_{trc\ Black\ Sea}$ (левая панель), среднемесячной концентрации загрязнителей в Черном море $\rho^{month}_{trc\ Black\ Sea}$ (правая панель)

Осредненные по всему бассейну Черного и Азовского морей концентрации трассеров, показанные на рисунке 2.4, демонстрируют отсутствие выраженной сезонности в адвекции трассеров из Азовского моря в Черное море. Сток Дона в Азовское море и связанный с ним приток трассеров имеют отчетливую сезонную изменчивость. Однако наличие запорной морфологии Азовского моря, связанной с Керченским проливом, препятствует этому сезонному сигналу, вызванному разгрузкой, в пределах эстуария. В результате мы не наблюдаем в модельном эксперименте значительной сезонной изменчивости потока растворенных загрязняющих веществ через Керченский пролив в Черное море.

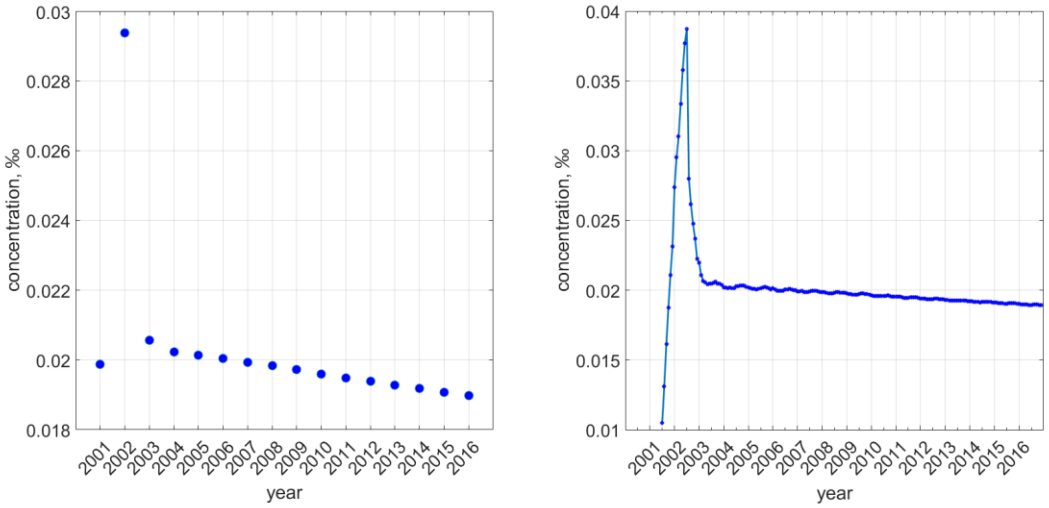


Рисунок 2.4 – Временные ряды концентрации загрязнителей в Черном море и Азовском море совокупно $\rho_{\mathrm{trc}}^{\mathrm{year}}$ (левая панель), среднемесячной концентрации загрязнителей в Черном море и Азовском море совокупно $\rho_{\mathrm{trc}}^{\mathrm{month}}$ (правая панель)

Мелководное Азовское море (средняя по бассейну глубина 7.5 м), является хорошо вентилируемым. Таким образом распределение трассеров по глубине не имеет ярко выраженной особенности, тем не менее, как следует из распределений среднегодичных концентраций на рисунке 2.5, верхний слой глубины 2 м имеет тенденцию несколько быстрее избавляться от трассеров. В случае Черного моря ситуация иная. Хорошо известно, что вентиляция в Черном море ограничена сильным галоклином на глубине около 100 м. Как видно из рисунка 2.6 галоклин служит естественным барьером для распространения трассеров. Интересно отметить наличие временного лага между пиком концентрации трассеров в Азовском море и пиком концентрации трассеров в перемешанном слое в Черном море. По нашим расчетам он составляет около 4 лет, таким образом мы прогнозируем, что в случае возникновения катастрофы, связанной с крупным выбросом загрязняющих веществ в акваторию Азовского моря, концентрация данных загрязнителей, по крайней мере в первые годы будет локализована в верхнем слое Черного моря ограниченном галоклином, при этом пик концентрации в верхнем слое будет достигнут через 48 месяцев. Далее растворенные загрязняющие вещества медленно проникают в глубокую часть моря или выносятся из акватории через пролив Босфор в Мраморное море.

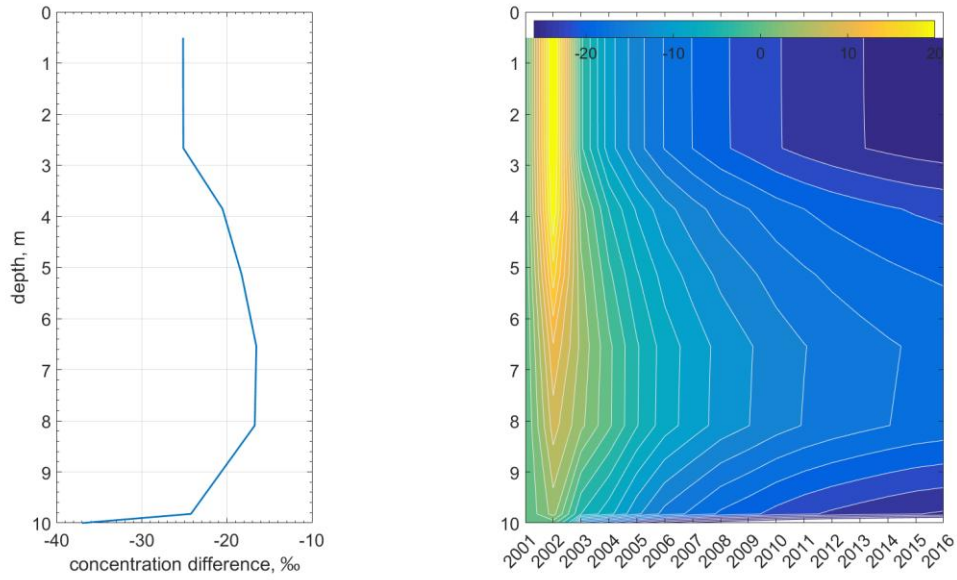


Рисунок 2.5 – Вертикальные распределения среднегодовой концентрации трассеров в Азовском море: разница между последним и первым годами эксперимента (левая панель), изменение по отношению к первому году интегрирования (правая панель)

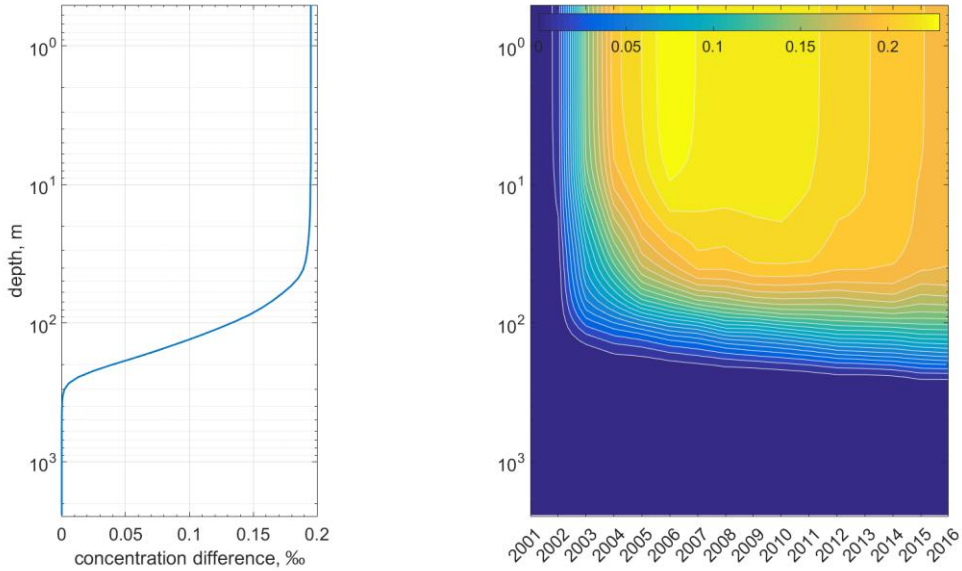


Рисунок 2.6 – Вертикальные распределения среднегодовой концентрации трассеров в Черном море: разница между последним и первым годами эксперимента (левая панель), изменение по отношению к первому году интегрирования (правая панель)

Выводы к разделу 2.

Полученные результаты работ полностью соответствуют требованиям Плана работ научного исследования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ К РАЗДЕЛУ 2

Ilyin, Yu. P., Fomin, V. V., D'yakov, N. N., and Gorbach, S. B.:Hydrometeorological Conditions of the Ukraine Seas. Vol. 1. The Azov Sea, Sevastopol, ECOSI-Gidrofizika, 2009

---

3 Определение характерных схем переноса морской взвеси и загрязнений в приустьевых акваториях малых рек российского черноморского побережья для различных типов ветрового воздействия с помощью модели STRiPE

С помощью численного моделирования изучено влияние различных типов ветрового воздействия на пространственно-временную изменчивость плюмов малых рек северо-восточной части Черного моря и перенос ими морской взвеси и загрязнений. Для восстановления речных расходов использовалась модель единичного гидрографа KW-GIUH. Метеорологические характеристики рассчитывались негидростатической атмосферной моделью WRF с пространственным разрешением 10 км. Для расчета термогидродинамических характеристик использовалась модель морской циркуляции INMOM со сгущением до 200 м в районе Сочи и модель речных плюмов STRiPE. Пространственно-временная изменчивость плюмов на синоптическом и сезонном временных масштабах анализировалась на основе модельных полей поверхностной солености и сравнивалась с изменчивостью внешних условий. На основе полученных данных описано влияние изменчивости речного расхода и ветра на площадь и время обновления воды в речных плюмах. Исследована скорость отклика плюмов на начало паводка, изучен процесс слияния плюмов в единую распресненную вдольбереговую полосу. Показано, что влияние половодьев и паводков на речные плюмы может быть очень разным из-за их различной продолжительности, интенсивности речных расходов и ветровой ситуации.

В работе исследуется сезонная и синоптическая изменчивость плюмов 9 наиболее крупных рек северо-восточной части Черного моря (рисунок 3.1), для

маловодного 2020 г. и полноводного 2021 г. Более крупные малые реки имеют площадь водосбора от 100 до 1500 км^2 и средний годовой расход 5–60 м^3/с, например, Псезуапсе (14.05 м^3/с), Шахе (28.13 м^3/с), Сочи (16.15 м^3/с), Мзымта (56.06 м^3/с), у совсем малых рек площадь водосбора от 50 до 100 км^2 и средний годовой расход меньше 5 м^3/с, например, Куапсе (0.75 м^3/с), Западный Дагомыс (2.27 м^3/с), Мацеста (2.76 м^3/с), Хоста (5.05 м^3/с), Кудепста (2.86 м^3/с).

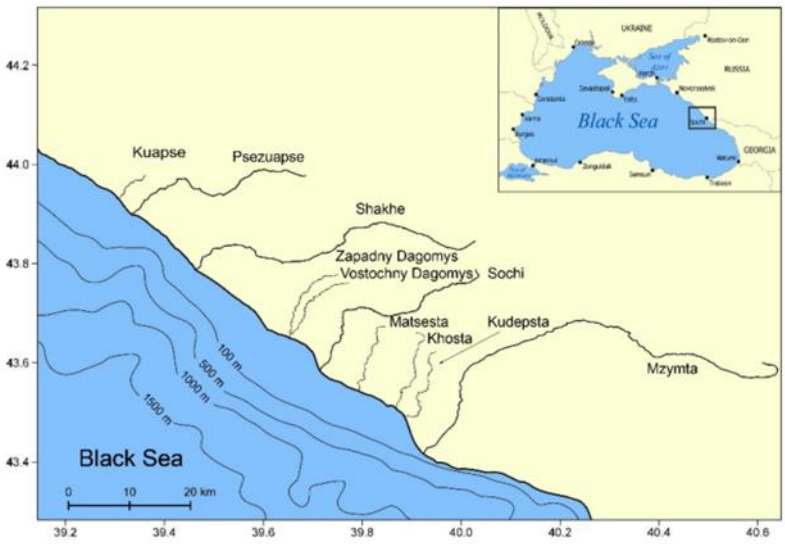


Рисунок 3.1 – Район исследования, батиметрия и расположение рек

Для исследования сезонной и синоптической изменчивости восстанавливались среднесуточные расходы пресной воды за 2020-2021 гг. рассматриваемых рек. Для рек Мзымта и Сочи они были подготовлены на основе данных по срочным расходам Гидрометслужбы России (https://gmvo.skniivh.ru/) и по среднесуточным уровням Автоматизированной системы мониторинга паводков Краснодарского края ЭМЕРСИТ (http://www.emercit.com). Мзымта – самая крупная река из малых рек кавказского побережья Черного моря. Ежегодно она вносит в море ~1.5 км^3 воды [Джаошвили, 2003]. Согласно полученным данным наблюдений (таблица 3.1), расход р. Мзымта за 2020 г. составил 1.09 км^3 и 1.94 км^3 за 2021 г. Расход р. Сочи составил 0.33 км^3 и 0.56 км^3 за 2020 г. и 2021 г. соответственно. Так, количество пресной воды, поступающей из рек в полноводный год, оказалось в 1.71-1.77 (таблица 3.2) раз больше, чем в маловодный.

На рисунке 3.2 представлены графики временных рядов расходов р. Мзымта и р. Сочи за 2020-2021 гг., построенные по среднесуточным данным. Для этих двух рек дополнительно определялись периоды паводков, половодий, максимальные пики расходов и суммарный сток (таблица 3.3). Паводки выделялись графо-аналитическим способом: при условии, что их среднесуточный пиковый расход превышает

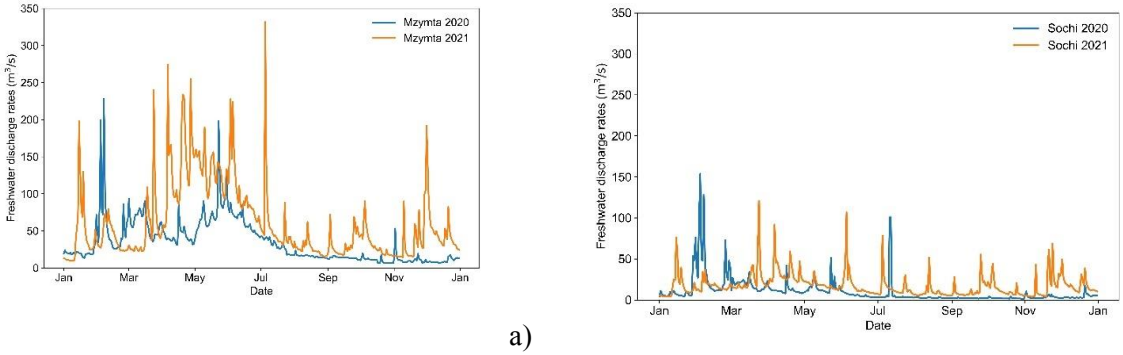
предшествующий паводку расход в 2-2.5 раза, а также превосходит по величине средний за многолетний период месячный расход. Половодье и тало-дождевые паводки были определены с учетом среднесуточных температур воздуха и количества осадков, измеренных на метеостанциях Сочи и Адлер. Критерием разделения осадков на дождь и снег было использовано граничное значение температуры воздуха в +2 °С в соответствии с рекомендациями [Христофоров и др., 2015]. Среднесуточные расходы других 7 рек (Псезуапсе, Шахе, Куапсе, Западный Дагомыс, Хоста, Мацеста, Кудепста) восстанавливались на основе доступных климатических [Джаошвили, 2003] и срочных (https://gmvo.skniivh.ru/) данных по расходам.

Таблица 3.1 – Сток рек ($км^3$) Мзымта и Сочи за 2020-2021 гг. по сезонам и за год и доля (%) сезонного стока от годового

	2020 г.					2021 г.				
Река	зима	весна	лето	осень	за год	зима	весна	лето	осень	за год
Мзымта ($км^3$)	0.23	0.48	0.30	0.08	1.09	0.35	0.84	0.49	0.25	1.94
Сочи ($км^3$)	0.13	0.12	0.05	0.02	0.33	0.13	0.20	0.11	0.11	0.56
Мзымта (%)	21	44	27	7	100	18	44	25	13	100
Сочи (%)	41	38	15	6	100	24	36	20	19	100

Таблица 3.2 – Отношение стока рек Мзымта и Сочи за 2020-2021 гг. по сезонам и за год

	2021/2020				
река	зима	Весна	лето	осень	за год
Мзымта	1.52	1.75	1.65	3.11	1.77
Сочи	1.00	1.65	2.26	5.82	1.71



а) б)

Рисунок 3.2 – Расходы рек Мзымта (а) и Сочи (б) в 2020-2021 гг.

Таблица 3.3 – Периоды (месяц, дата), длительность (дни), пики расходов ($м^3/с$) и суммарный сток ($км^3$) паводков и половодий рек Мзымта и Сочи за 2020-2021 гг.

Река/год	периоды паводков (месяц, дата)		длительность паводков (дни)	пики ($м^3/с$)	суммарный сток ($км^3$)
Мзымта 2020	Паводки				
	Январь-февраль	29.01-14.02	17	228.5	0.109
	Декабрь	21.12-24.12	4	17.4	0.005
	Половодье				
	Февраль-июль	24.02-31.07	159	198.2	0.755
Сочи 2020	Паводки				
	Январь-февраль	29.01-10.02	13	153.7	0.071
	Апрель	16.04-19.04	4	41.6	0.007
	Май	23.05-28.05	6	51.3	0.012
	Ноябрь	01.11-03.11	3	10.5	0.002
	Половодье				
	Февраль-март	24.02-22.03	28	73.1	0.059
Мзымта 2021	Паводки				
	Январь	10.01-21.01	12	137.9	0.081
	Февраль	05.02-18.02	14	79.5	0.068
	Февраль-март	28.02-01.03	2	30.6	0.005
	Август	13.08-14.08	2	62.2	0.009
	Сентябрь	03.09-04.09	2	71.9	0.009
	Сентябрь	17.09	1	33	0.003
	Сентябрь-октябрь	24.09-02.10	9	68.9	0.038
	Октябрь	04.10-08.10	5	89.9	0.027
	Ноябрь	24.11	1	78	0.007
	Ноябрь-декабрь	29.11-07.12	9	192	0.074
	Декабрь	09.12-10.12	2	49.9	0.008
	Декабрь	18.12	1	53.2	0.005
	Декабрь	20.12-22.12	3	82.5	0.015
	Половодье				
	16.03-05.08	16.03-05.08	143	332	1.241
Сочи 2021	Паводки				
	Январь	11.01-21.01	11	76.2	0.029

	Февраль	5.02-17.02	13	36.8	0.024
	Март	16.03-21.03	6	42.5	0.016
	Март	23.03-28.03	6	121	0.026
	Май	09.05-11.05	3	35.5	0.007
	Июнь	02.06-10.06	9	107	0.029
	Июль	05.07-08.07	4	78.5	0.013
	Июль	23.07-24.07	2	30.5	0.004
	Август	13.08	1	51.4	0.004
	Сентябрь	3.09	1	27.7	0.002
	Сентябрь	25.09-26.09	2	55.3	0.007
	Октябрь	04.10-06.10	3	44.4	0.009
	Ноябрь	20.11-21.11	2	61.4	0.009
	Ноябрь	24.11-25.11	2	68.7	0.008
	Ноябрь	29.11-03.12	5	49.4	0.015
	Декабрь	17.12-22.12	6	38.5	0.013
	Половодье				
	Апрель-май	01.04-05.05	35	91.6	0.094

Лето, осень и начало зимы 2020 г. на черноморском побережье были засушливые, поэтому на реке Сочи (и других малых реках этого района) меженный период длился почти 7 месяцев: с 9 июня 2020 г. по 10 января 2021 г. На Мзымте аналогичный период низкой водности установился позже, примерно с 6 августа, после окончания половодья, обусловленного таянием снегов в среднегорной высотной зоне. Продолжительная межень привела к тому, что 2020 г. на р. Сочи стал следующим самым маловодным годом после 1986 г. за 75-летний период наблюдений.

В 2021 г. из-за обильных осадков паводки на реках проходили несколько раз в месяц. Наиболее длительный период между паводками составил лишь 21 день (с 14 июня по 4 июля), при этом объем летнего стока 2021 г. превысил объем прошлого года в 1.65–2.26 раз, а осеннего в 3.11–5.82 раз для рек Мзымта и Сочи соответственно.

Для исследования необходимости использования часовых данных расходов рек вместо суточных в подобных численных расчетах термогидродинамических характеристик северо-восточной части Черного моря, дополнительно были получены часовые расходы пресной воды 9 исследуемых рек на периоды двух интенсивных июльских паводков 2021 г. (4-6 и 22-24 июля). Для большей части рек (Псезуапсе, Шахе, Сочи, Мзымта, Куапсе, Хоста) расходы были предоставлены Сочинским ЦГМС ЧАМ (https://www.pogodasochi.ru/). Расходы других рек (Западный Дагомыс, Мацеста и Кудепста) оценивались по модели KW-GIUH. KW-GIUH (модель геоморфологического мгновенного единичного гидрографа) представляет собой событийную модель дождевого стока и является эффективным инструментом для реконструкции

гидрологической реакции водосбора реки на интенсивные осадки. Модель использует геоморфологическую информацию о порядках русловой сети и характеристиках склонов. Время добегания склонового и руслового стока для каждого подбассейна оценивается по формулам, выведенным из теории кинематической волны [Lee, Yen, 1997; Lee et al., 2009; Гончуков и др., 2019]. Геоморфологические характеристики частных водосборов и русел (их длины и уклоны) получены при обработке данных MERIT DEM (http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/~yamadai/MERIT_DEM/) [Yamazaki et al., 2019] с помощью инструментария ArcGIS. Ширина русла в устьевом створе определялась с привлечением космических снимков. Коэффициенты шероховатости склонов и русел были откалиброваны на предыдущих паводковых событиях 25 июня 2015 и 24-25 октября 2018 [Korshenko et al., 2020]. Исходными данными для модели служили часовые осадки, измеренные на автоматических метеостанциях Сочинского ЦГМС ЧАМ.

Для расчета термогидродинамических характеристик (полей поверхностной солености и течений) использовалась эйлерова модель морской циркуляции INMOM (Institute of Numerical Mathematics Ocean Model) [Volodin et al., 2013] и лагранжева модель речного плюма STRiPE (Surface-Trapper River Plume Evolution) [Osadchiev and Zavialov, 2013]. Региональная комбинация моделей INMOM и STRiPE ранее уже использовалась в нескольких работах, посвященных прибрежной циркуляции, речным плюмам и переносу загрязняющих веществ [Osadchiev and Korshenko, 2017, Korshenko et al., 2020]. Ниже приводится краткое описание модели и используемых исходных данных.

Региональная версия INMOM высокого разрешения со сгущением сеточной области в районе исследования покрывает бассейн Черного моря, исключая Азовское и Мраморное моря. Модельная горизонтальная сетка содержит 642×715 точек по долготе и широте соответственно. Для реализации сгущения в представленной модели использовалась сферическая система координат с одним из полюсов, расположенным в районе исследования (40,205° в.д., 43,84° с.ш.). Такой подход приводит к неравномерной сетке, горизонтальное пространственное разрешение которой увеличивается от ~200 м у полюса до ~ 4.5 км в юго-восточной части Черного моря (рисунок 3.3). По вертикали задавались 20 неравномерно распределенных по глубине σ-уровней со сгущением у поверхности, для достижения высокого разрешения вблизи ее.

Батиметрия модели задавалась на основе массива GEBCO с пространственным разрешением 15” (www.gebco.net). Атмосферное воздействие, включая турбулентные

потоки тепла, соли и импульса, рассчитывалось на основе данных о коротковолновой и длинноволновой радиации, температуре воздуха, осадках, относительной влажности, давлении на уровне моря и ветре, получаемых при расчете атмосферной региональной негидростатической модели WRF (Weather Research and Forecasting Model) [Skamarock et al., 2008], реализованной в ФГБУ «ГОИН» с пространственным разрешением 10 км и с дискретностью по времени, равной 1 час. Водообмен через Керченский и Босфорский проливы, соединяющие Черное море с Азовским и Мраморным морями, а также сток крупных рек Черного моря, включающих Дунай, Днестр, Днепр, Риони, Ингури, Ешильырмак, Кызылырмак, Сакарья, задавались на основе доступных климатических данных [Джаошвили, 1999]. Для основных 9 рек исследуемого региона использовались восстановленные среднесуточные данные, за исключением дополнительного расчета, когда в период июльских паводков (4-6 и 22-24 июля 2021 г.) использовались рассчитанные часовые данные. Трехмерные среднемесячные климатические термохалинные поля для Черного моря с горизонтальным разрешением 0.1°×0.0625° и с 36 вертикальными z-уровнями от 0 до 2150 м были предоставлены МГИ РАН (Морской гидрофизический институт РАН) [Полонский и др., 2013]. Эти данные использовались в качестве начального состояния модели. Все необходимые данные интерполировались на сеточные области модели. Шаг модели по времени и разрешение выходных данных задавались равными 90 с и час соответственно.

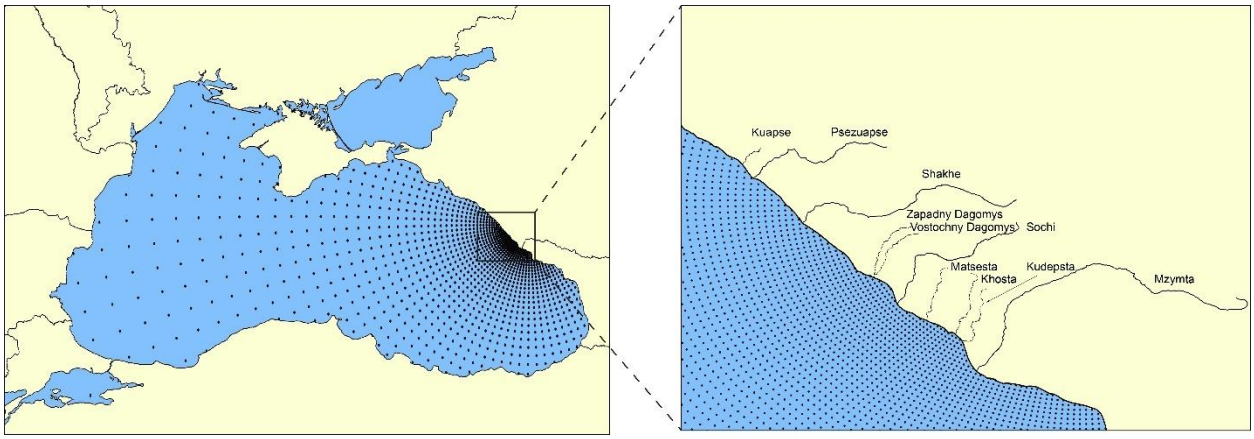


Рисунок 3.3 – Расчетная область модели INMOM на акватории Черного моря (показана каждая 15-я точка сетки) (слева) и в районе исследования (каждая 5-я точка) (справа)

Для расчета времени обновления воды в плюмах рек Мзымта и Сочи и выброса речных частиц на берег использовалась модель STRiPE. Модель STRiPE воспроизводит движение и диссипацию отдельных «частиц» речного стока в море. Частица в модели представляет собой небольшую в сечении однородную колонну воды, простирающуюся от поверхности плюма вниз до границы между плюмом и

нижележащими морскими водами. Частицы выпускаются из речного устья с заданным временным интервалом и заданной начальной скоростью, равной скорости течения реки в устье при впадении в море. Начальные координаты, плотность и высота выпускаемых частиц задаются равными координатам речного устья, плотности речной воды и глубине реки в устье, соответственно, а начальное ускорение частиц задается равным нулю. Количество единовременно выпускаемых частиц пропорционально объему речного стока, поступающего в море в моделируемый момент времени.

Движение отдельно взятой частицы в море определяется балансом сил, приложенных к ней. Интерполяция физических характеристик (плотности и толщины) по всей совокупности частиц на регулярную сетку в каждый момент времени задает речной плюм, и, таким образом, воспроизводится его распространение и перемешивание. Предполагается, что плюм остается приуроченным к приповерхностному слою моря, поэтому модель воспроизводит двумерное движение частиц. Тем не менее, вода внутри каждой частицы испытывает вертикальное перемешивание с нижележащими морскими водами, так что в процессе перемешивания плотность частицы растет, а высота частицы убывает до тех пор, пока частица не растворится в море окончательно, т.е. исчезнет из набора моделируемых частиц.

В рамках исследования в качестве начальных данных для проведения расчетов использовались гидрометеорологические характеристики (поля приводного ветра и скорости течений), рассчитанные по моделям WRF и INMOM, а скорость Стоксова дрейфа задавалась по доступным данным европейской службы CMEMS: для периода с 1 января 2020 г. по 1 июля 2020 г. – данным глобального анализа и прогноза характеристик волнения (GLOBAL_ANALYSIS_FORECAST_WAV_001_027), а с 1-ого июля 2020 г. по 1 января 2022 г. – по данным анализа и прогноза характеристик волнения для Черного моря (BLKSEA_ANALYSISFORECAST_WAV_007_003). Приповерхностные скорости течений, рассчитанные по модели INMOM с временной дискретностью, равной 1 часу, переинтерполировались в географическую систему координат с размерами ячеек 250×250 м^2. Считалось, что лагранжевы частицы перемещались под воздействием течений, скорости Стоксова дрейфа и 2% от скорости ветра. Каждый час в ячейках сетки размером 250×250 м^2 в окрестности устьев малых рек (таблица 4) региона (Псезуапсе, Шахе, Сочи, Мзымта, Куапсе, Западный Дагомыс, Хоста, Мацеста, Кудепста) генерировалось определенное количество плавающих лагранжевых частиц. Количество выпускаемых частиц полагалось пропорциональным расходу рек. В качестве периодов расчетов рассматривались все паводки за 2020 и

2021 гг (таблица 3.3) с учетом суточных данных расходов рек. Для 2021 г. дополнительно был проведен расчет июльских паводков (4-6 и 22-24 июля) с учетом часовых расходов, чтобы выяснить достаточную для подобных исследований дискретность используемых расходов. В расчетах считалось, что при столкновении с берегом частица выносится на берег и остается на нём.

Таблица 4 – Координаты устьев рек, в окрестности которых происходил выпуск лагранжевых частиц

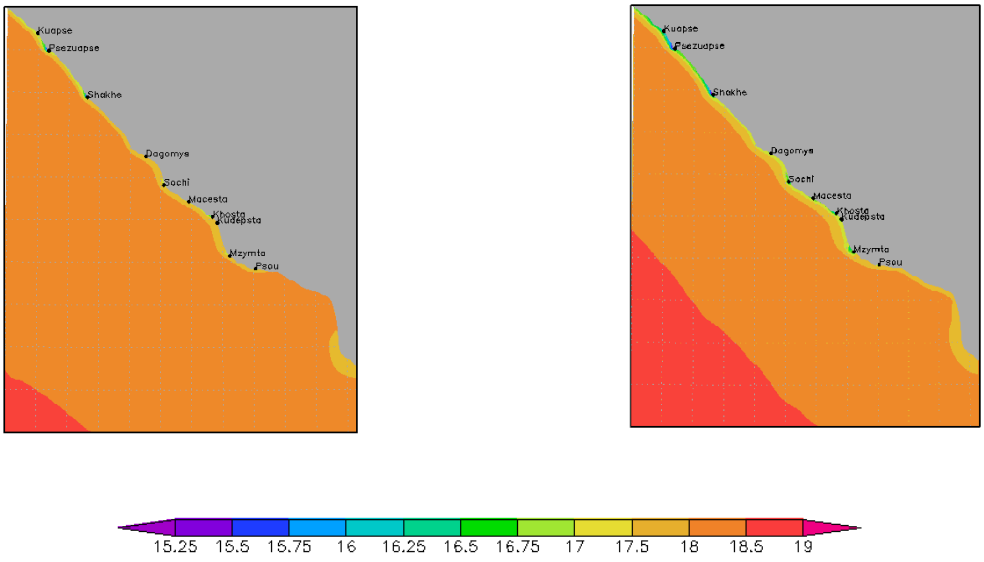
Река	Долгота	Широта
Mzymta	39.92267	43.41412
Kudepsta	39.88275	43.48
Hosta	39.8674	43.5064
Macesta	39.79063	43.54241
Sochi	39.71078	43.58292
Dagomys	39.65244	43.64819
Shakhe	39.46205	43.78773
Psezuapse	39.33307	43.89802
Kuapse	39.29718	43.93954

Все реки рассматриваемого региона, в основном, горные и характеризуются ежегодным весенне-летним половодьем, которое формируется за счёт талых вод [Джаошвили, 2003]. Вне зависимости от сезона существенное, но кратковременное, поднятие уровня воды в реках может происходить в результате мощных дождевых паводков. Во время паводков максимальные значения расходов малых рек могут превышать средние значения в 10 и более раз, а также составлять 65-80% годового стока малых рек. В 2020 г. сток рек во время паводков и половодья составил для р. Мзымта 79% от ее годового стока, а для р. Сочи 46%. Для 2021 г. значения были еще выше и составили 82% и 56% для рек Мзымта и Сочи соответственно. Как половодье с наложением высоких дождевых пиков, так и обильные паводки могут приводить к наводнениям. На рис. 2 можно заметить выбросы в значениях расходов рек Мзымта и Сочи, которые соответствуют паводкам.

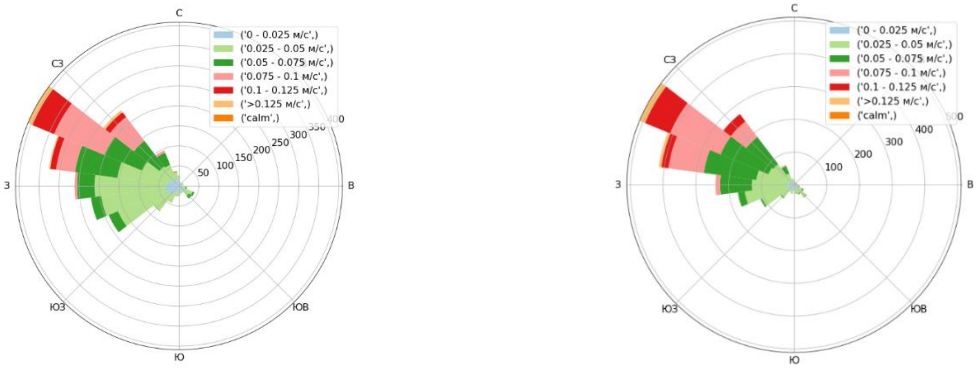
Для исследования сезонной и межгодовой изменчивости плюмов рек Мзымта и Сочи первоначально анализировались среднесуточные расходы рек для 2020-2021 гг. (рисунок 3.2). В таблице 3.1 представлен сток рек Мзымта и Сочи по сезонам и за год,

а также доля (%) сезонного стока от годового, а в таблице 3.2 показано отношение стока двух лет (полноводного к маловодному). Далее анализировались среднемесячные и сезонные поля поверхностной солености в области северо-восточного побережья, полученные на основе часовых данных результатов расчетов модели INMOM, а также сезонные розы ветров в районе устьев рек Мзымта и Сочи. Наиболее показательными были картины поверхностной солености и роз ветров по сезонам, представленные на рисунке 3.4.

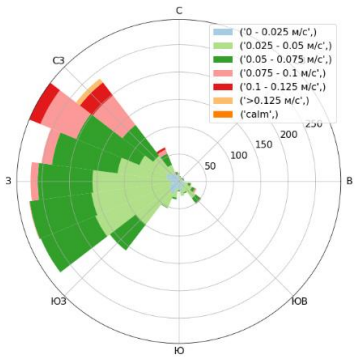
Зима, 2020 Зима, 2021



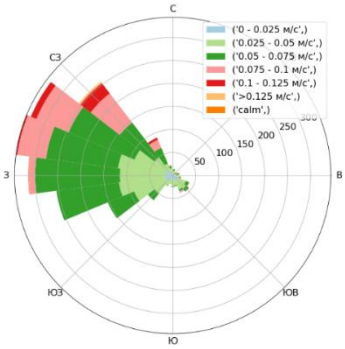
Мзымта



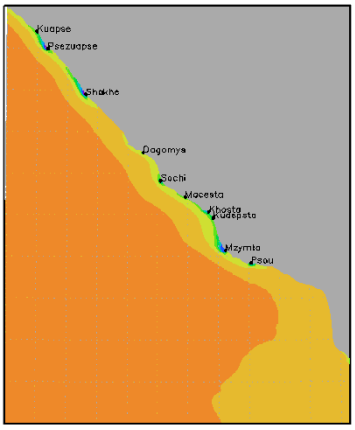
Сочи

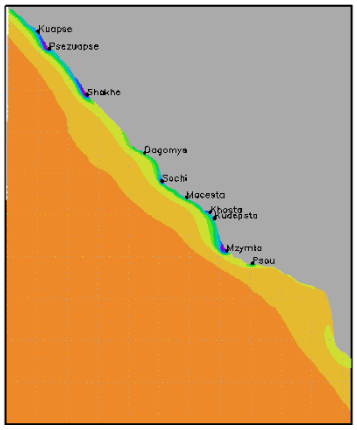


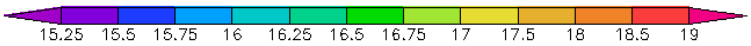
Весна, 2020



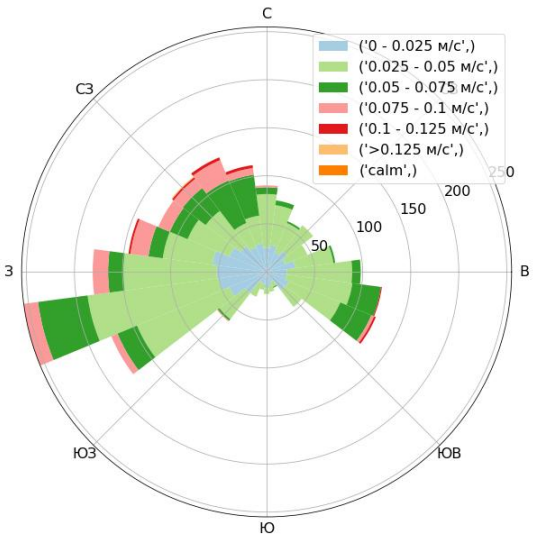
Весна, 2021

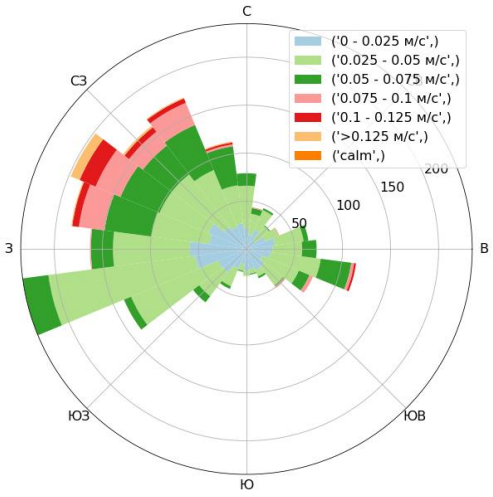




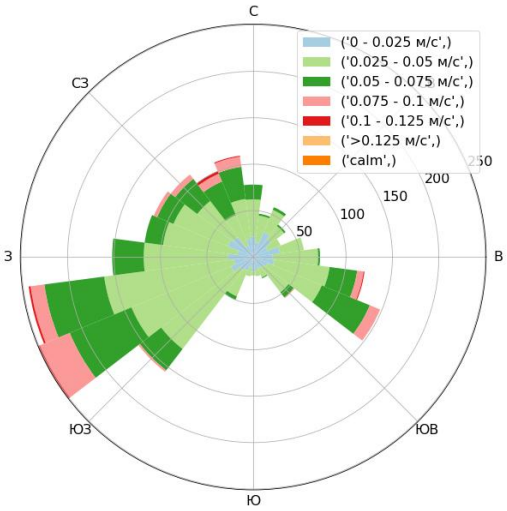


Мзымта

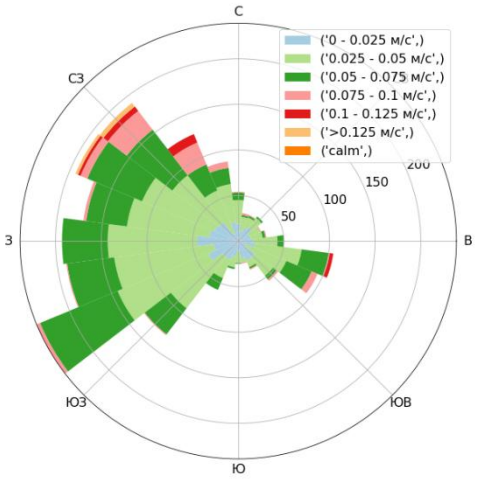




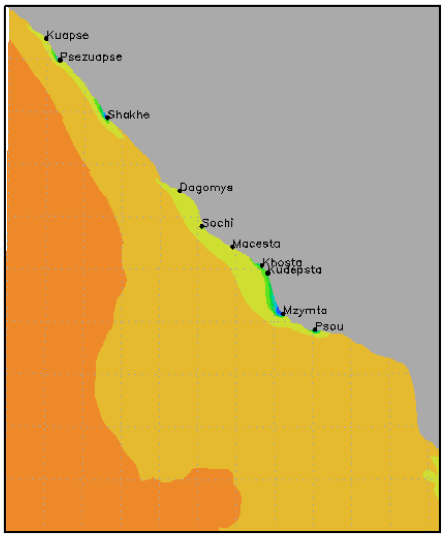
Сочи

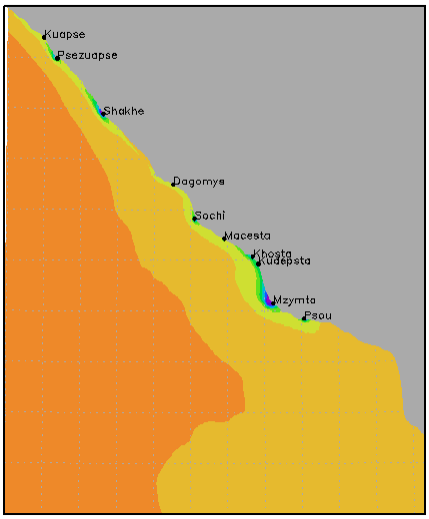


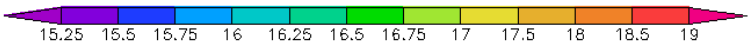
Лето, 2020



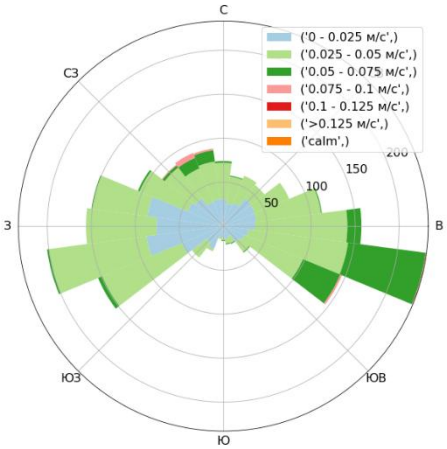
Лето, 2021

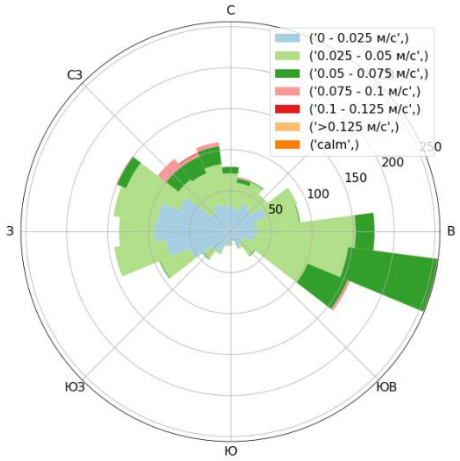




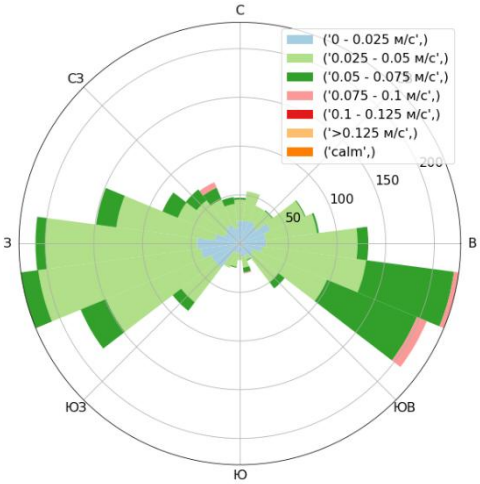


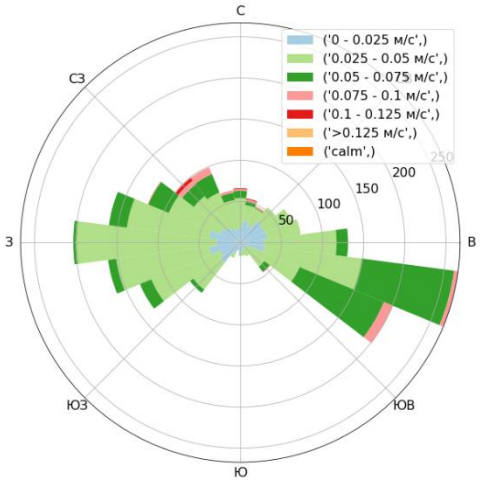
Мзымта





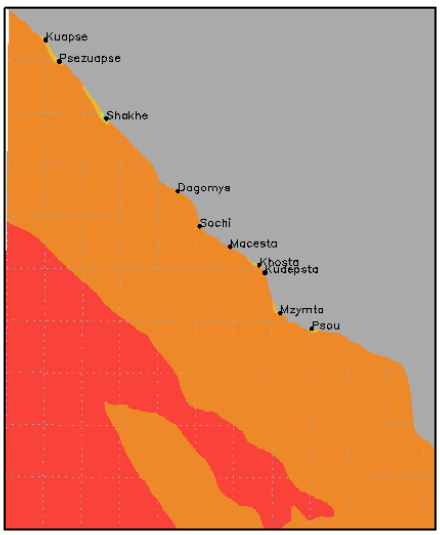
Сочи

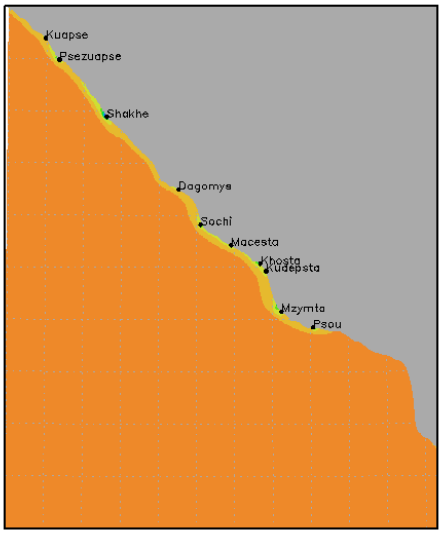


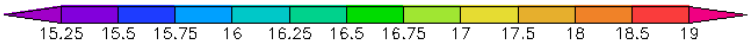


Осень, 2020

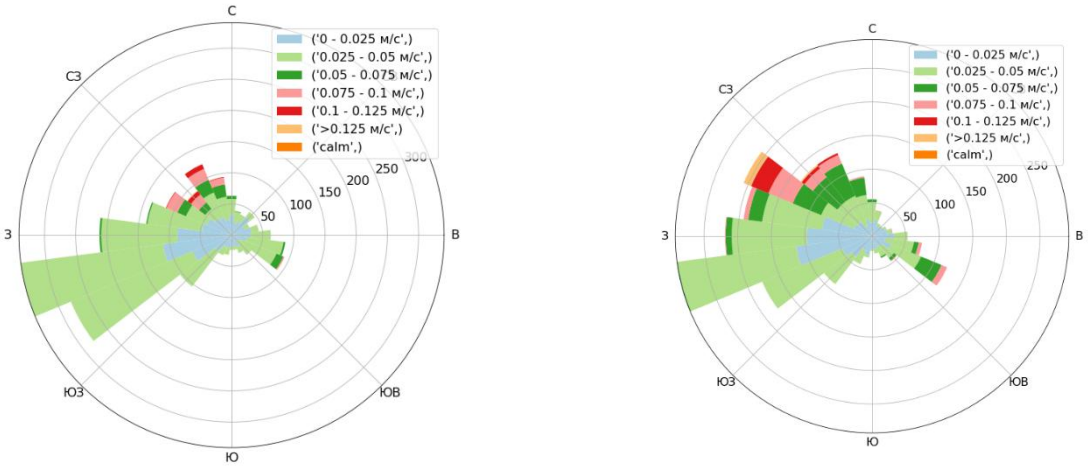
Осень, 2021







Мзымта



Сочи

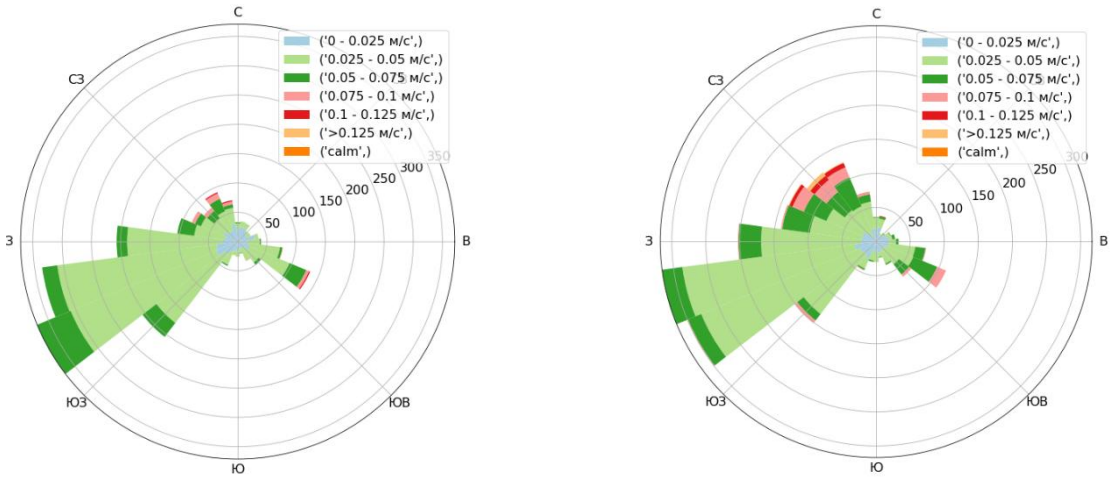


Рисунок 3.4 – Смоделированные сезонные поля поверхностной солености в районе северо-восточного побережья Черного моря и розы ветров по модели WRF у устьев рек Мзымта и Сочи для маловодного 2020 г. (слева) и полноводного 2021 г. (справа). Шкала полей поверхностной солености представлена в psu. Градация скорости ветра представлена в м/с

Ранее отмечалось, что отношение стока рек Мзымта и Сочи между полноводным 2021 г. и маловодным 2020 г. составляет более 1.7 раз (таблица 3.1) и в основном зависит от количества прошедших паводков. За период 2020-2021 гг. произошло 2 и 13 паводков на р. Мзымта, 4 и 16 паводков на р. Сочи. В 2020 г. было 2 зимних паводка на р. Мзымта и 1 на р. Сочи, а в 2021 г. для каждой из рек паводков было примерно в 3 раза больше (7 у Мзымты и 3 у Сочи). Однако, из таблицы 3.1

видно, что в зимний сезон, сток р. Мзымта отличается в 1.52 раза, а для р. Сочи сток для двух лет совпадает. Это значит, что помимо количества паводков в течение года необходимо анализировать их продолжительность и интенсивность.

Из таблицы 3.2 видно, что в зимний сезон 2020 г. сток рек Мзымта и Сочи составил около 20% (0.23 км^3) и 40% (0.13 км^3) от их годового стока (1.09 и 0.33 км^3) в основном из-за длительного и интенсивного паводка, отмеченного сразу на двух реках в январе-феврале. Паводок одновременно начался 29 января, продолжался 17 и 13 дней с пиками в расходах, доходящими до 228 и 153.7 м^3/с для рек Мзымта и Сочи соответственно. Суммарно, за период паводка сток рек Мзымта и Сочи составил половину (0.109 и 0.071 км^3) всего стока за зимний сезон. Для полноводного 2021 г. сток рек Мзымта и Сочи составил 18% (0.35 км^3) и 23% (0.13 км^3) от их годового стока (1.94 и 0.56 км^3). В 2021 г. также отмечались длительные (от 12-14 дней у Мзымты и от 11-13 дней у Сочи) и совместные для двух рек паводки в январе (10.01/11.01-21.01) и феврале (05.02-17.02/18.02), однако пики паводков не превосходили 137.9 м^3/с для Мзымты и 76.2 м^3/с для Сочи, а сток рек за период этих двух паводков суммарно составил только около 40% (0.149 и 0.051 км^3) от всего зимнего стока. Анализ роз ветров показывает, что в зимний период преобладают В-ЮВ ветра, с магнитудой, иногда превышающей 0.1 м/с и более слабые В-СВ ветра (до 0.075 м/с). Такие направления ветра в основном способствуют движению течений в СЗ направлении, поэтому на картинах солености видна узкая полоса распресненных вод вдоль берега. Так как розы ветров схожи между годами, на отличие картин поверхностной солености и большее распреснение морских вод вдоль берега в 2021 г. в основном влияет раннее проанализированная разница между стоком рек.

В отличие от зимнего сезона, отношения стока для весеннего и летнего сезонов двух лет не так сильно отличаются от годовых значений (1.71-1.77 км^3), поэтому разница между картинами поверхностной солености заметнее. Для р. Мзымта отношение стока 2020-2021 гг. (таблица 3.2) составляет 1.75 и 1.65 раз, а для р. Сочи 1.65 и 2.26 раз соответственно по сезонам. В картины поверхностной солености весенне-летних сезонов значительный вклад вносят половодья р. Мзымта (24.02-31.07 2020г. (159 дней, 0.75 км^3) и 16.03-05.08 2021 г. (143 дня, 1.241 км^3), половодья р. Сочи менее интенсивны и долговременны (24.02-22.03 2020г. (28 дней, 0.059 км^3) и 01.04-05.05 2021 г. (35 дней, 0.094 км^3). Как и в случае зимнего сезона, на распреснение у устьев рек влияет количество стока, а на распреснение вдоль берега или более мористой части влияет направление ветра. В весенний сезон к генеральным ЮВ-В-СВ направлениям ветра, способствующим вытягиванию плюмов вдоль берега,

добавляются Ю-ЮВ и З-СЗ ветра, которые указывают на смену ветра. При смене ветра от СВ до ЮЗ против часовой стрелки плюмы отходят от берега и распространяются от устьев в более мористую часть. При смене ветра по часовой стрелке, плюмы концентрируются у устьев и рядом с ними. В 2021 г. ЮВ-В-СВ ветра были чаще и интенсивнее, чем в 2020 г. (до 0.125 м/с), что способствовало вытягиванию и слиянию распресненных морских вод вдоль берега. В летний сезон происходит ослабление СВ-В-ЮВ-Ю ветра до 0.05 м/с, интенсификация З-СЗ ветра до 0.1 м/с и уменьшение количества стока в сравнении с весенним сезоном, что влияет на итоговые картины сезонной солености.

В осенний сезон, отношения стока для двух лет наиболее отличаются друг от друга, что влияет на итоговые картины солености. Для р. Мзымта отношение стока 2020-2021 гг. (таблица 3.2) составляет 3.11 раз, а для р. Сочи 5.82 раз. Преобладающие направления роз ветров осеннего сезона схожи с весенними розами ветров, только меньшей амплитуды.

Анализ показал, что на общие картины сезонных полей поверхностной солености для маловодного (2020 г.) и полноводного (2021 г.) влияет период возникновения, количество, длительность и интенсивность паводков, то есть отличие в значениях стока и преобладающих значениях направления и магнитуды ветра.

В данном исследовании для количественной оценки плюмов рек Мзымта и Сочи для каждой из рек анализировалась изменчивость суммарной и средней площади плюма за сезон, полученной на основе суточных данных по площадям. Плюмом считалась область, соленость которой не превосходит 16.5 psu. Такое контрольное значение солености лучше всего подходило для идентификации плюма в период малых вод (низкий расход рек) в маловодный год, когда плюм образовывался в окрестности устья реки и практически не распространялся вдоль берега.

Структура и динамика речного плюма сильно зависят от его пространственного масштаба, который может меняться от нескольких метров до сотен километров, учитывая высокую короткопериодную изменчивость расхода рек во время половодий и паводков. Кроме того, размеры отдельного речного плюма могут иметь собственную значительную внутригодовую изменчивость и, следовательно, разнообразные закономерности формирования, распространения и перемешивания в течение года, обусловленные межсезонной изменчивостью расхода рек и преобладающими амплитудой и направлением ветра у устьев. Межгодовая площадь плюмов малых рек также существенным образом различается в разные годы по тем же причинам.

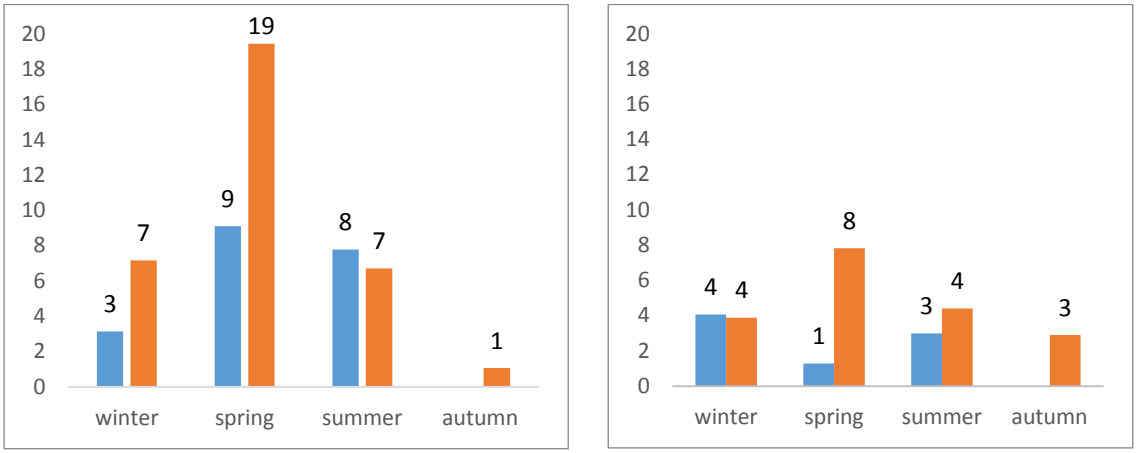


Рисунок 3.5 – Изменчивость средней за сезон площади плюмов (км^2) от рек Мзымта (слева) и Сочи (справа) в 2020-2021 гг

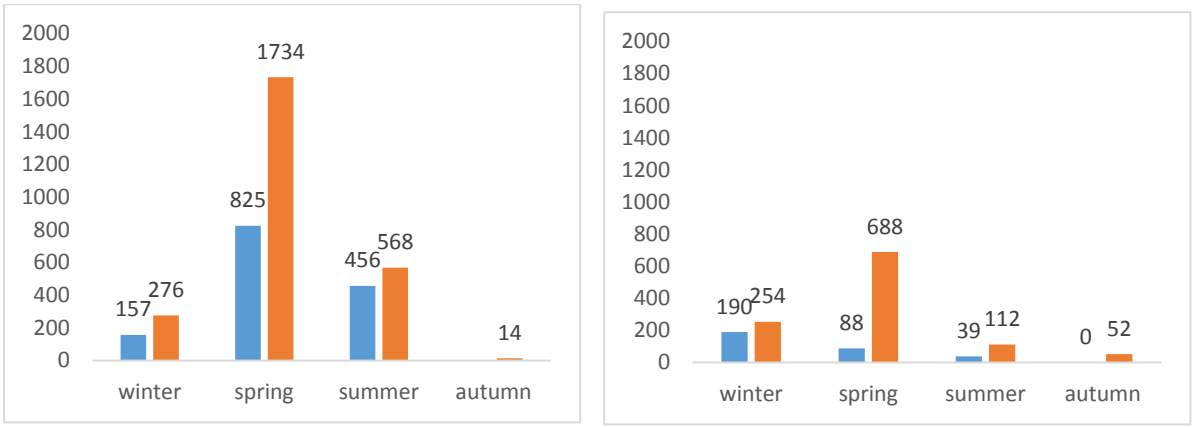


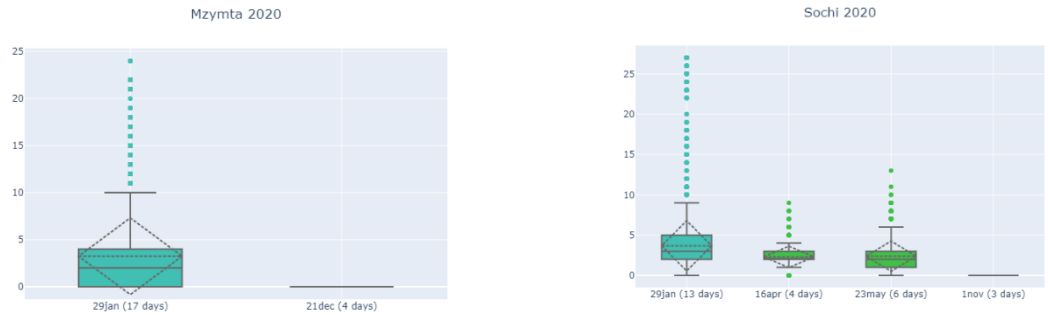
Рисунок 3.6 – Изменчивость суммарной за сезон площади плюмов (км^2) от рек Мзымта (слева) и Сочи (справа) в 2020-2021 гг.

Изменчивость площадей плюмов зависит от многих факторов (расхода рек, полей ветра, гидрологических особенностей акватории, формы берега и др.). Согласно полученным результатам сезонной изменчивости (рисунок 3.5) средней и суммарной площадей плюмов, отчетливо видно влияние интенсивных паводков (зима), весенне-летних половодий с наложением паводков (весенне-летний сезон), и слабых паводков (осень). Однако, помимо влияния расхода рек, существенно влияет пространственно-временная структура поля ветра. В зимние сезоны 2020-2021 гг. поля ветра у устьев рек Мзымта и Сочи похожи между собой и при преобладающем ЮВ-В-СВ ветре (рисунок 3.4), с амплитудой до 0.1 м/с получается, что значения стока рек соизмеримо (таблицы 3.1-3.2) влияют на значения сезонной площади их плюмов. При уменьшении амплитуды ветра и смене генерального направления ветра (рисунок 3.4) в весенне-летний сезон зависимость сезонной площади от расхода рек уменьшается и можно предположить, что при частой смене ветра возрастает влияние ветра на площади плюмов, как в большую, так и в меньшую сторону. То же можно сказать и про осень,

когда возвращается ЮВ-В-СВ ветер, но с продолжающейся сменой ветра. Плюмы рек Мзымта и Сочи под действием частой смены ветра чаще концентрируются у устьев рек или наоборот распространяются в мористую часть моря, что влияет на площадь плюмов. Анализ среднесуточных значений выявил, что максимальное значение площади плюма р. Мзымта составило чуть больше 70 км^2 в мае 2020г., и чуть меньше 70 км^2 в апреле 2021 г, а у р. Сочи – в феврале 2020 г. около 20 км^2 и в апрель 2021 г. – 30 км^2. Получается, что высокие значения расходов рек не гарантируют наибольшую площадь речных плюмов. В 2021 г. у р. Мзымта наибольший расход наблюдался в июле, а наибольшая площадь была в мае.

Таким образом, из-за межгодовой и внутригодовой изменчивости расходов рек и изменчивости пространственно-временной структуры поля ветра, сезонного анализа не хватает, чтобы установить однозначное влияние этих параметров на площади плюмов и необходимо исследовать синоптическую изменчивость, анализирую каждый из паводков по-отдельности.

Для исследования синоптической изменчивости плюмов в условиях полноводного (2021 г.) и маловодного (2020 г.) годов анализировались все ранее выделенные паводки (таблица 3) для р. Мзымта (2 паводка в 2020 г.; 13 в 2021 г.) и р. Сочи (4 паводка в 2020 г.; 16 в 2021 г.). Для каждого из паводков учитывались периоды паводков, их длительность, пики расходов, суммарный сток, количество оставшихся частиц в море и выброшенных на берег, преобладающее направление ветра, частота его смены и максимальная амплитуда у устьев рек, а также время обновления воды (рисунок 3.7) в плюмах (таблица 3.5).



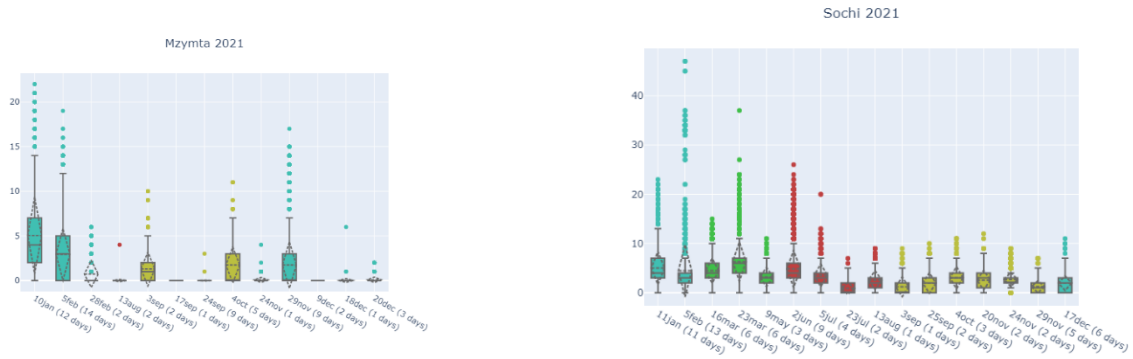


Рисунок 3.7 – Время обновления воды (час) для паводков маловодного 2020 г. (сверху) и полноводного 2021 г. (снизу) на реках Мзымта (слева) и Сочи (справа). Ящичковые диаграммы показывают медиану, верхний и нижний квартили, минимальное и максимальное значения, а также все выбросы в наборе данных. Пунктиром показано среднее значение, а цветом выделены сезоны возникновения паводков (бирюзовый – зима, зеленый – весна, красный – лето, желтый – осень)

Таблица 3.5 – Характеристики паводков (периоды паводков (месяц, дата), длительность (длит., дни), пики (пики, $м^3/с$), суммарный сток (сум., $км^3$), количество выброшенных частиц речной воды на берег (выб., шт.), количество оставшихся речных частиц в море (ост., шт.), преобладающее направление ветра у устьев рек и наличие частой смены направления (напр.), максимальная амплитуда ветра у устьев рек (амп., м/с), время обновления воды в плюмах (вр., час))за 2020-2021 гг. для рек Мзымта и Сочи

река/год	периоды паводков (месяц, дата)		длит. (дни)	пики ($м^3/с$)	сум. ($км^3$)	кол-во (шт)	выб. (шт)	ост. (шт)	напр.	ампл. (м/с)	вр. (час)
Мзымта 2020	Паводки										
	Январь-февраль	29.01-14.02	17	228.5	0.109	18912	93.6	6.4	В-ЮВ, смена	>12.5	3.3
	Декабрь	21.12-24.12	4	17.4	0.005	744	21.6	78.4	СВ-В-ЮВ, смена	до 12.5	-
Сочи 2020	Паводки										
	Январь-февраль	29.01-10.02	13	153.7	0.071	12335	89.9	10.1	СВ-В-ЮВ, смена	>12.5	3.7
	Апрель	16.04-19.04	4	41.6	0.007	1080	57.8	42.2	Все, кроме СЗ-С-СВ	до 0.1	2.3
	Май	23.05-28.05	6	51.3	0.012	1896	85.2	14.8	В-ЮВ, СЗ-З	до 10	2.4
	Ноябрь	01.11-03.11	3	10.5	0.002	240	29.2	70.8	СВ-В, В-ЮВ, смена	до 10	-
Мзымта 2021	Паводки										
	Январь	10.01-21.01	12	137.9	0.081	13560	67.0	33.0	В-ЮВ,	>12.5	5

									смена		
	Февраль	05.02-18.02	14	79.5	0.068	11256	94.3	5.7	В-ЮВ, смена	до 12.5	3
	Февраль-март	28.02-01.03	2	30.6	0.005	384	9.1	90.9	СВ-В	до 5	0.7
	Август	13.08-14.08	2	62.2	0.009	936	75.2	24.8	ЮВ, смена	до 10	-
	Сентябрь	03.09-04.09	2	71.9	0.009	1080	60.0	40.0	З-СЗ, смена	до 10	1.3
	Сентябрь	17.09	1	33	0.003	503	3.6	96.4	ЮВ, З-СЗ	до 7.5	-
	Сентябрь-октябрь	24.09-02.10	9	68.9	0.038	6000	22.3	77.7	СВ-В-ЮВ, З-СЗ, смена	>12.5	-
	Октябрь	04.10-08.10	5	89.9	0.027	4056	13.3	86.7	СВ-В-ЮВ-Ю смена	до 10	1.7
	Ноябрь	24.11	1	78	0.007	1175	29.8	70.2	ЮВ, СЗ, смена	до 10	0.1
	Ноябрь-декабрь	29.11-07.12	9	192	0.074	12000	89.0	11.0	В-ЮВ, смена	>12.5	1.7
	Декабрь	09.12-10.12	2	49.9	0.008	672	46.3	53.7	СВ-В-ЮВ, смена	до 12.5	-
	Декабрь	18.12	1	53.2	0.005	792	31.2	68.8	ЮВ, СЗ	до 7.5	-
	Декабрь	20.12-22.12	3	82.5	0.015	1824	47.5	52.5	В-ЮВ, смена	до 10	0.1
Сочи 2021	Паводки										
	Январь	11.01-21.01	11	76.2	0.029	3855	79.9	20.1	В-ЮВ, смена	>12.5	5
	Февраль	5.02-17.02	13	36.8	0.024	3483	88.0	12.0	В-ЮВ, смена	до 12.5	4.5
	Март	16.03-21.03	6	42.5	0.016	2193	87.0	13.0	СВ-В-ЮВ	до 10	4.5
	Март	23.03-28.03	6	121	0.026	3333	79.4	20.6	СВ-В-ЮВ, смена	>12.5	6.3
	Май	09.05-11.05	3	35.5	0.007	920	98.3	1.7	все	до 12.5	3.2
	Июнь	02.06-10.06	9	107	0.029	4523	94.2	5.8	все, кроме СЗ-С-СВ	до 7.5	4.8
	Июль	05.07-08.07	4	78.5	0.013	1111	55.8	44.2	все, кроме СЗ-С-СВ	до 12.5	3.5

	Июль	23.07-24.07	2	30.5	0.004	89	30.9	69.1	В-ЮВ, смена	до 7.5	0.9
	Август	13.08	1	51.4	0.004	559	72.8	27.2	В-ЮВ-Ю	до 12.5	2.6
	Сентябрь	3.09	1	27.7	0.002	136	33.3	66.7	СЗ-З, смена	до 10	1.2
	Сентябрь	25.09-26.09	2	55.3	0.007	323	38.5	61.5	В-ЮВ	>12.5	2
	Октябрь	04.10-06.10	3	44.4	0.009	274	24.3	75.7	СВ-В-ЮВ	до 7.5	3
	Ноябрь	20.11-21.11	2	61.4	0.009	720	100.0	0.0	В-ЮВ	до 10	2.6
	Ноябрь	24.11-25.11	2	68.7	0.008	585	56.7	45.9	все	до 10	2.7
	Ноябрь	29.11-03.12	5	49.4	0.015	1396	64.7	35.3	СВ-В-ЮВ	>12.5	1.3
	Декабрь	17.12-22.12	6	38.5	0.013	1709	85.8	14.2	все	до 10	2

Для периодов паводка анализировался часовой ветер у устьев рек за полдня до наступления самого паводка, так как предшествующий ветер и опреснение морской воды у устьев рек за счет повышения расхода у рек накануне значительно влияет на дальнейшее распространение плюмов. Исходя из полученных результатов, влияние ветра хорошо согласуется с данными работы [Osadchiev and Sedakov, 2019], где было проанализировано влияние направления и амплитуды на распространение плюма р. Мзымта. В случае р. Сочи влияние схоже, только необходимо учитывать рельеф берега у каждого из устьев, так как устье р. Мзымта находится на более уходящем в море выступе, чем р. Сочи, что влияет на загрязнение прибрежной и морской зоны под действием разного ветра. Дополнительно необходимо учитывать смену направления ветра. В случае смены ветра от ЮВ до СЗ по часовой стрелке частицы выбрасывались на берег рядом с устьем. При противочасовой смене ветра речная вода распространялась в более мористую часть, где в результате перемешивания с морской воды наблюдались более низкие значения солености по сравнению с окружающими водами. Также стоит учитывать, что в период межени и после нее, паводок должен быть достаточно интенсивным, чтобы вода опреснилась до выбранного значения 16.5 psu, которое в данном исследовании считается границей плюмов. Поэтому время обновления воды в плюмах очень зависит от длительности, интенсивности и направлении ветра за период паводков и в рамках исследования, даже при самых благоприятных условиях, редко превосходит 6 часов (Сочи, 2021 г., 23.03-28.03).

Количество частиц, выброшенных с речной водой на берег за период паводков, (таблица 3.5) напрямую зависит от длительности, интенсивности паводка, динамики

ветра и Стоксова дрейфа. При В-ЮВ-Ю ветре и достаточной магнитуде (~10 м/с) частицы по большей части выбрасываются на берег северо-западнее от устьев рек. При З-СЗ-С ветре, они, наоборот, попадают на берег юго-восточнее от устьев рек.

Для образования полосы вдоль северо-восточного побережья есть несколько благоприятных факторов образования: ЮВ ветер с амплитудой около 10 м/с без резкой смены направления в течение суток, высокие пики паводков (больше 30 $м^3$/с, кроме периода межени) или большой суммарный расход. Далее при смене ветра против часовой стрелки, все частицы по большей части уходят в море, а при почасовой смене ветра частицы распространяются в ЮВ направлении.

Для проверки необходимости задания часовых расходов рек в рамках подобных исследований для определения выноса частиц на берег был произведен запуск лагранжевых частиц от рассматриваемых рек вдоль побережья северо-восточной части Черного моря на период июльских паводков 2021 г. Под действием ветра и прибрежного течения частицы постепенно распространялись вдоль всего берега, в основном, в северо-западном направлении, но часть частиц – и в юго-восточном направлении. Некоторые частицы проникали вплоть до Геленджикской бухты, часть частиц выносилась в глубоководную часть моря. Но в большинстве случаев происходил вынос частиц на берег. Так, они могут быть обнаружены вдоль всего северо-восточного побережья ЧМ. Причем нет практически никакой разницы в распределение частиц вдоль берега при условии задания различных значений расходов рек (среднесуточных или часовых).Согласно полученным результатам, пока нет необходимости в часовых расходах (таблица 3.6).

Таблица 3.6 – Количество выброшенных частиц за период июльских паводков 2021 г.

	Всего частиц	На берегу
2021 г.	283608	201893
2021 г., часовой расход рек	291790	194654

По сравнению с предыдущей работой по воспроизведению паводка в октябре 2018 г [Korshenko et al., 2020] существенных отличий в процессах распространения лагранжевых частиц не прослеживается. Лагранжевы частицы отмечают границы отдельных речных плюмов и их дрейф от речного устья, а также степень их смешения между собой. Вначале плюмы взаимодействуют как отдельные структуры с четкими границами, но с течением времени эти границы диссипируют, и плюмы от рассматриваемых малых рек объединяются в единую опресненную узкую полосу, как показано в работе [Korshenko et al., 2020], или в несколько полос. В результате

адвекции плюмы вытягиваются вдоль берега и перемешиваются между собой. Остается только граница между прибрежным опреснением и соленым морем.

Выводы к разделу 3.

Полученные результаты работ полностью соответствуют требованиям Плана работ научного исследования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ К РАЗДЕЛУ 3

Джаошвили, Ш.В. 2003. Реки Чёрного Моря. Мецниереба.186 с.

Христофоров, А.В., Юмина, Н.М., Белякова, П.А., 2015. Прогноз паводкового стока рек Черноморского побережья Кавказа с заблаговременностью одни сутки. Вестник Московского университета. Серия 5. География, (3), 50–57

Korshenko, E.A., Zhurbas, V.M., Osadchiev, A.A., Belyakova, P.A., 2020. Fate of river-borne floating litter during the flooding event in the northeastern part of the Black Sea in October 2018, Marine Pollution Bulletin, 160, 111678, https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111678

Lee, K.T.; Cheng, N.K.; Gartsman, B.I.; Bugayets, A.N. 2009. A current version of the model of a unit hydrograph and its use in Taiwan and Russia. Geography and Natural Resources, 30(1), 79–85. doi: 10.1016/j.gnr.2009.03.015

Lee, K.T. and Yen, B.C. 1997. Geomorphology and kinematic-wave based hydrograph deviation. Journal of Hydraulic Engineering, 123, 73–80. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1997)123:1(73)

Osadchiev, A.A.; Korshenko, E.A. 2017. Small river plumes off the north-eastern coast of the Black Sea under average climatic and flooding discharge conditions. Ocean Science, 13, 465–482. doi: 10.5194/os-13-465-201

Osadchiev A.A., and Sedakov R.O. 2019. Spreading dynamics of small river plumes off the northeastern coast of the Black Sea observed by Landsat 8 and Sentinel-2. Remote Sens. Environ. 221, 522–533. doi: 10.1016/j.rse.2018.11.043

Skamarock, W.C.; Klemp, J.B.; Dudhia, J.; Gill, D.O.; Barker, D.; Duda, M.G.; Huang, X.Y.; Wang W.; Powers, J.G. 2008. A Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Technical Notes. doi:10.5065/D68S4MVH

Volodin, E.M.; Dianskii, N.A.; Gusev, A.V. 2010. Simulating present-day climate with the INMCM4.0 coupled model of the atmospheric and oceanic general circulations. Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics, 46, 414–431. doi: 10.1134/s000143381004002x

Yamazaki D., Ikeshima D., Sosa J., Bates P. D., Allen G. H., Pavelsky T.M. 2019. MERIT Hydro: a high resolution global hydrography map based on latest topography dataset. Water Resources Research, 55, 5053–5073. http

---

4 Моделирование гидрохимического режима и кислородного режима моря с помощью биогеохимической модели BROM

Черное море содержит самый большой в мире объем сульфидных вод. Положение верхней границы сероводорода связано с поступлением кислорода который используется на окисление органического вещества и восстановленных соединений нескольких химических элементов, таких как сера, марганец, железо, азот и др. Изменение климата и антропогенное воздействие резко влияют на биогеохимический режим Черного моря. Глубина кислородного слоя моря зависит от вертикального перемешивания, которое переносит растворенный кислород из верхнего эвфотического слоя в более глубокие слои, и потребления растворенного кислорода на окисление произведенного в море автохтонного органического вещества (ОВ) и доставленного из прибрежной зоны аллохтонного ОВ и на восстановленные формы перечисленных элементов. Изменение гидродинамических свойств моря из-за более теплых зим ограничивает обновление холодного промежуточного слоя (ХПС) Черного моря и, следовательно, доставку растворённого кислорода в более глубокие слои. Эвтрофикация приводит к увеличению аллохтонного ОВ, что увеличивает интенсивность кислородного истощения. Процессы кислородного истощения и образования CO_2 взаимосвязаны в кислородной зоне, но в случае ОВ минерализации повышенных объемов ОВ в субоксильных и бескислородных условиях следует ожидать увеличения содержания CO_2 в толще воды, что должно привести также и к асидификации.

Применение моделей представляет собой эффективный инструмент для исследования таких комплексных вопросов, что и реализуется в рамках данного проекта.

4.1 Методы

В проекте используется биогеохимическая модель BROM (Yakushev et al., 2017), описывающая биогеохимические процессы в водной толще (рисунок 4.1). Бентосно-пелагическая биогеохимическая модель BROM сочетает в себе относительно простую модель экосистемы с подробной биогеохимической моделью для водного столба, придонного пограничного слоя и верхнего слоя осадка с акцентом на изменения кислородныго режима и окислительно-восстановительных условий. BROM рассматривает взаимосвязанные преобразования химических веществ (N, P, Si, C, O, S, Mn, Fe) и органического вещества (ОВ) в единицах азота в соответствии с соотношением Редфилда между основными биогенными веществами.

Динамика ОВ включает параметризацию продукции (посредством фотосинтеза и хемосинтеза) и распада через кислородную минерализацию, денитрификацию, восстановление металлов, восстановление сульфатов и метаногенез. Чтобы обеспечить подробное представление об изменении окислительно-восстановительных условий, ОВ в BROM минерализуется несколькими различными акцепторами электронов, а растворенный кислород потребляется как при минерализации ОВ, так и при окислении различных восстановленных соединений. ОВ описывается в модели как растворенное лабильное ОВ, растворенное полулабильное ОВ, взвещенное лабильное ОВ и взвешенное полулабильное ОВ.

Распад лабильных форм приводит к высвобождению фосфата и аммония и превращению лабильных форм в полулабильные. При распаде ОВ расходуются акцепторы электронов и выделяется углекислый газ. Это позволяет модели учитывать изменения стехиометрии Редфилда во время минерализации ОВ. Ингибирование процесса в соответствии с окислительно-восстановительным потенциалом параметрируется различными переключателями, зависящими от окислительно-восстановительного потенциала. BROM также включает модуль, описывающий карбонатные равновесия; это позволяет использовать BROM для исследования асидификации моря, воздействия изменения pH и состояния насыщения на биогеохимию воды и отложений. Подробное описание BROM приведено в статье (Yakushev et al., 2017). Использование этой модели даёт возможность проследить, как климатические изменения влияют на формирование эвтрофикации моря, развитие гипоксии и асидификацию.

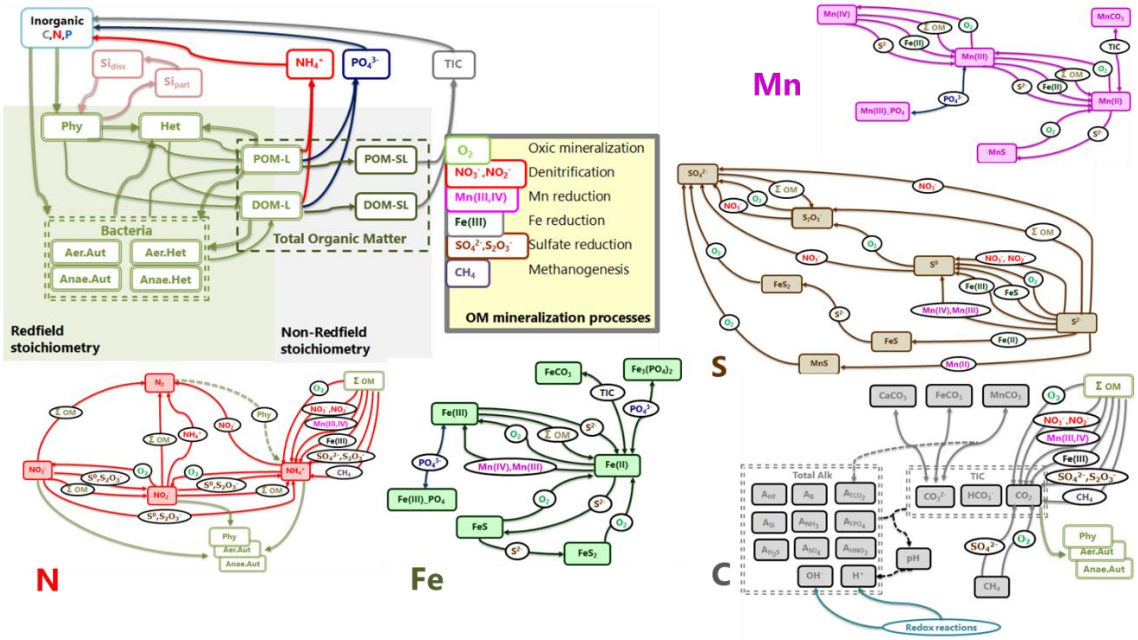


Рисунок 4.1 – Схема биогеохимических процессов, учитывающихся в модели BROM

Мы использовали объединённую ранее модель BROM-2DBP со специализированной библиотекой FABM (Bruggeman J., Bolding, K., 2014). С целью более точного воспроизведения моделью тонуой структуры окислительно-восстановительного слоя была введена параметризация изменения вертикальной скорости взвешенного вещества за счёт агрегации с оксидом марганца IV:

$$(W_{\mathrm{Ci}} = W_{\mathrm{Ci0}} + W_{\mathrm{Me}} * \mathrm{Mn(IV)}/(\mathrm{Mn(IV)} + 0.1) \quad),$$

где W_{Ci} – суммарная вертикальная скорость, W_{Ci0} – собственная вертикальная скорость взвешенного вещества, Mn(IV) – концентрация оксида марганца.

Кроме того, с целью улучшения параметризации газообмена на границе вода-воздух были добавлены зависимости скорости газообмена через поверхность пузырьков воздуха и капелек воды, образующихся при обрушении волн.

Гидрофизическим форсингом являлись ежечасные данные для 2010 года о температуре, солёности и ортогональных составляющих течений для точки с координатами 43.5 °с.ш. 37.75 °в.д с портала службы морской информации европейского сообщества “Copernicus”. Данные являются результатом расчёта реанализа на основе гидродинамической численной модели Nemo (Lima at al., 2020).

Результаты

В модели рассматривался верхний слой 0-350 м, позволяющий проиллюстрировать смену окислительно-восстановительных условий. Полученные данные сравнивались с данными натурных наблюдений экспедиции на нис “Knorr” в

марте 2003 года (рисунок 4.2). Полученные вертикальные распределения гидрохимических параметров согласуются с существующей гидрохимической структурой черного моря. Растворённый кислород имеет аналогичное распределение в модели и наблюдениях, занимая верхний 70-метровый слой, его начало было расположено выше, чем появление сероводорода при около 150 м. В пределах окислительно-восстановительного слоя были воспроизведены максимумы нитратов, Mn(iv), Mn(iii), Fe(iii), элементарной серы и минимум фосфата. Ниже окислительно-восстановительного слоя модель воспроизводила максимумы Vn(ii) и Fe(ii). Сероводород появляется на горизонте около 80 м. Таким образом, redox-слой находится в слое от 50 до 80 м.

Межгодовая изменчивость гидрохимических параметров, рассчитываемых в модели BROM (рисунок 4.3), показывает весенние максимумы активности фитопланктона и содержания кислорода и летние подповерхностные максимумы биогенных веществ, высвобождающихся из образовавшейся отмёршей органики. При этом RedOx-слой в течение 3-х лет остаётся практически неизменен по глубине. Органическое вещество распределено в соответствии с общими закономерностями его продукции и деструкции. Лабильные части (растворённые и взвешенные) расположены выше полулабильных, их максимумы следуют за периодами активности фито- и зоопланктона.

а	б

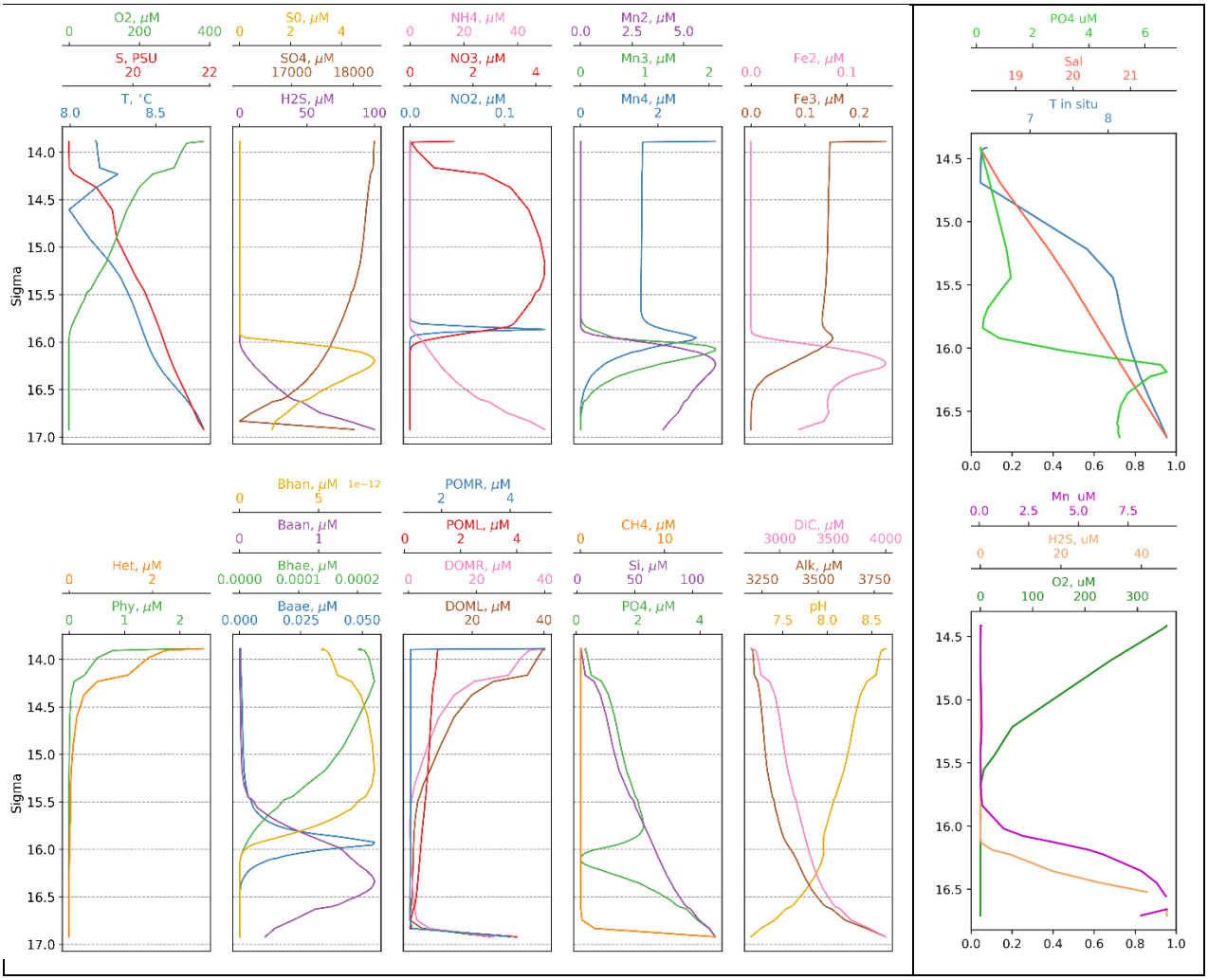


Рисунок 4.2 – Профили биогеохимических параметров, рассчитанных по модели для марта после установления решения модели (а), б – данные натурных наблюдений экспедиции на НИС “Knorr”, март 2003 г. (б) (Pakhomova et al, 2009)

Выводы к разделу 4.

Для изучения биогеохимического режима Черного моря был применена биогеохимическая модель BROM, в которой параметризована взаимосвязанная трансформация элементов O-N-P-C-Si-S-Mn-Fe. Были выполнены расчеты в одномерном варианте, где физические параметры были заданы по результатом вычислений по модели NEMO, доступными через E.U. Copernicus Marine Service Information “Copernicus”.

Результаты расчетов по модели BROM хорошо подтверждается данными наблюдений.

В 2022 году были сделаны усовершенствования модели BROM, было параметризовано ускорение погружения частиц взвеси при осаждении окисленного марганца, и для расчетов газообмена было учтен эффект образования пены при

больших скоростях ветра. Усовершенствованный код модели был загружен на удаленный репозиторий GITHUB.

На следующих этапах проекта мы планируем использовать настоящие результаты моделирования в качестве начальных условий для оценки влияния как климатические изменения характеристик перемешивания и связанные с человеком поступления аллохтонного ОВ влияют на биогеохимическую структуру и кислородный режим моря.

Полученные результаты работ полностью соответствуют требованиям Плана работ научного исследования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ К РАЗДЕЛУ 4

1. 1. Yakushev, E. V., Protsenko, E. A., Bruggeman, J., Wallhead, P., Pakhomova, S. V., Yakubov, S. Kh., Bellerby, R. G. J., and Couture, R.-M.: Bottom RedOx Model (BROM v.1.1): a coupled benthic–pelagic model for simulation of water and sediment biogeochemistry, Geosci. Model Dev., 10, 453–482, https://doi.org/10.5194/gmd-10-453-2017, 2017;
2. Bruggeman, J., Bolding, K., 2014. A general framework for aquatic biogeochemical models. Environmental Modelling & Software 61: 249–265. DOI: 10.1016/j.envsoft.2014.04.002;
3. Lima, L., Aydogdu, A., Escudier, R., Masina, S., Ciliberti, S. A., Azevedo, D., Peneva, E. L., Causio, S., Cipollone, A., Clementi, E., Cretí, S., Stefanizzi, L., Lecci, R., Palermo, F., Coppini, G., Pinardi, N., & Palazov, A. (2020). Black Sea Physical Reanalysis (CMEMS BS-Currents) (Version 1) set. Copernicus Monitoring Environment Marine Service (CMEMS). https://doi.org/10.25423/CMCC/BLKSEA_MULTIYEAR_PHY_007_004.
4. Pakhomova S.V., Rozanov A.G., Yakushev E.V., 2009. Dissolved and Particulate Forms of Iron and Manganese in the Redox Zone of the Black Sea Oceanology , 2009, Vol. 49, No. 6, pp. 773–787.

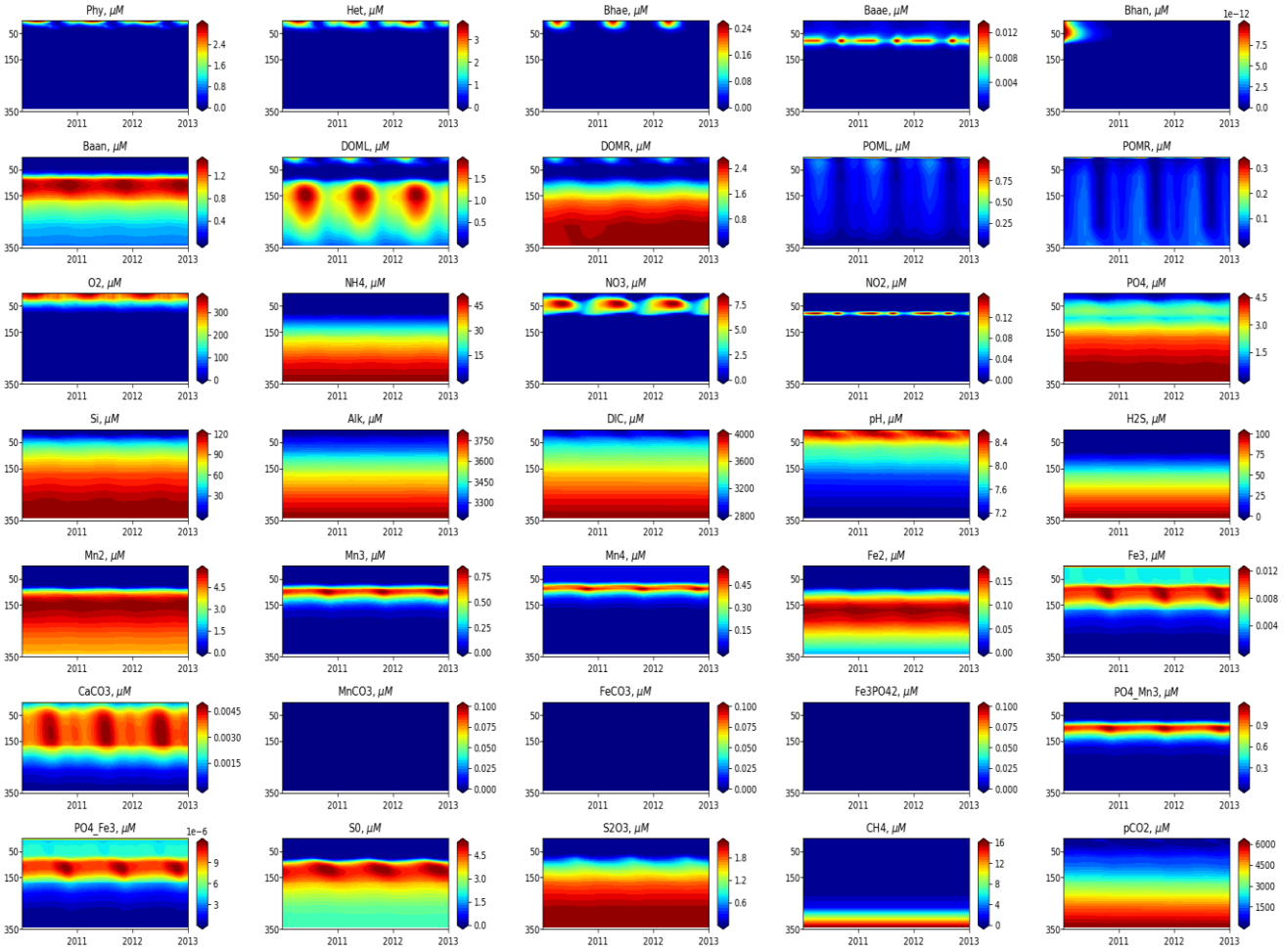


Рисунок4.3 – Межгодовая изменчивость рассчитанных по модели характеристик в последние 3 года счёта

5 Исследование характеристик ветрового волнения и его влияния на перенос загрязнений с помощью волновой модели MIKE21SW

В рамках проекта создана локальная модель района Большого Сочи, позволяющая описывать распространение речных плюмов, которые формируются в прибрежной зоне в период паводков. Важной задачей экологического мониторинга является диагноз и прогноз распространения пассивной примеси, поступающей с речным стоком. Основной целью исследований являлся анализ распространения речных плюмов в прибрежной зоне Черного моря. На основании численного моделирования рассмотрены сценарии распространения речных плюмов при различных реально наблюдаемых гидрометеорологических условиях. Сравнение результатов расчетов со спутниковыми данными показало их качественное соответствие.

5.1 Описание модели и исходные данные

Основные модели, используемые в исследовании:

1. Трехмерная гидродинамическая модель, основанная на численном решении уравнений Навье-Стокса. Включает блок транспорта температуры и солености, позволяющий путем обратной связи учитывать в основных уравнениях эффекты плавучести. Дополнительно существует возможность подключения модулей расчета транспорта связного (илистые компоненты) или несвязного (песчаные фракции) донного материала.
2. Спектральная волновая модель, описывающая нарастание, затухание и трансформацию в прибрежной зоне ветрового волнения. Модель учитывает рефракцию волн, трансформацию с учетом батиметрических особенностей, эффекты локального ветрового воздействия, диссипацию энергии вследствие донного трения и обрушения.
3. Трехмерная модель транспорта связных осадков, описывающая распространения илистых материалов под воздействием гидродинамических факторов (течения, волнение, стратификация).

Указанные модели могут быть объединены в единый вычислительный комплекс, учитывающий эффекты взаимодействия волн и течений в условиях меняющегося рельефа дна.

Гидродинамика прибрежной зоны Черного моря формируется под влиянием как локальных особенностей, так и более крупномасштабных процессов. По этой причине задача решается в два этапа:

1. За интересующий период рассчитываются поля течений, волнения и уровня для всего Черного моря.
2. Полученные поля используются в качестве граничных и начальных условий для моделирования распространения речных плюмов в заданной прибрежной зоне.

Входные данные, используемые в крупномасштабной гидродинамической модели Черного моря:

1. Исходная батиметрия, построена на основе российских навигационных карт (рисунок 5.1).
2. Речной сток. Используются данные о среднегодовых значениях стоков рек в акваторию Черного моря, приведенные в (Джоашвили, 2002). Положение устьев рек указаны на рисунок 5.1.

3. Карты приземного атмосферного давления, осадков и испарения. Выбираются из массива данных глобального атмосферного реанализа ERA-Interim, представленного Европейским центром среднесрочных прогнозов (http://apps.ecmwf.int). Пространственное разрешение составляет 0.25 градуса, шаг по времени – 3 часа. 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}). Заметим, что анализ ERA-Interim представлен с 1979 года и находится в свободном доступе. Таким образом, данные ERA-Interim позволяют сформировать поля атмосферного давления и компонент скорости ветра над заданной акваторией с временны́м шагом 3 часа. Пример модулей и направлений приземной скорости ветра приведен на рисунке 5.2.
4. Расчетная сетка. Триангуляционная расчетная сетка содержит 15000 расчетных элементов (рисунок 5.3). По вертикали – 20 слоев в терминах □-координат.

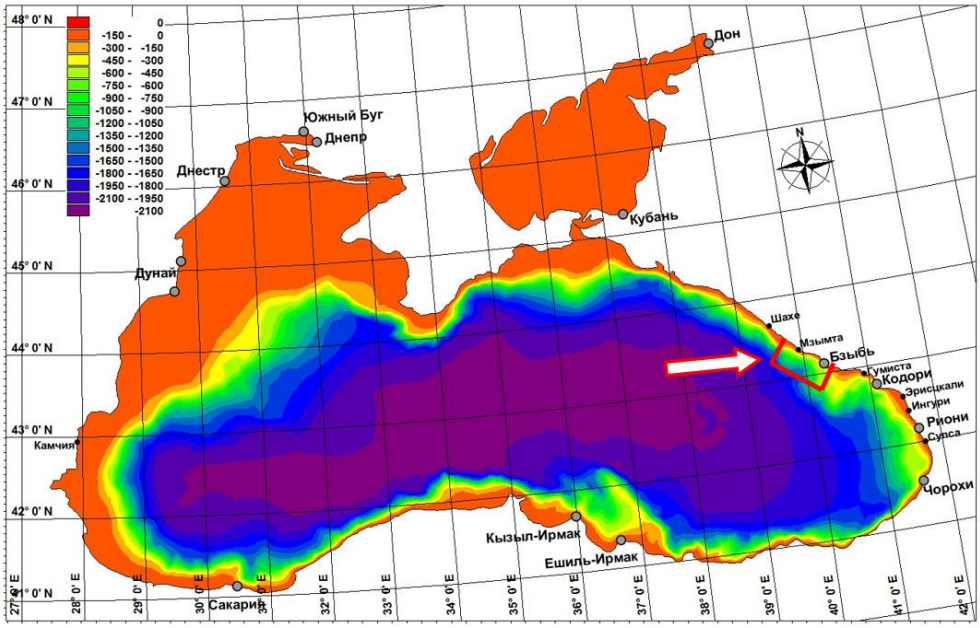
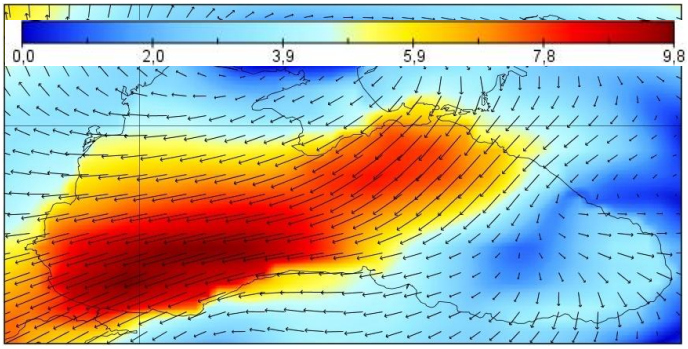
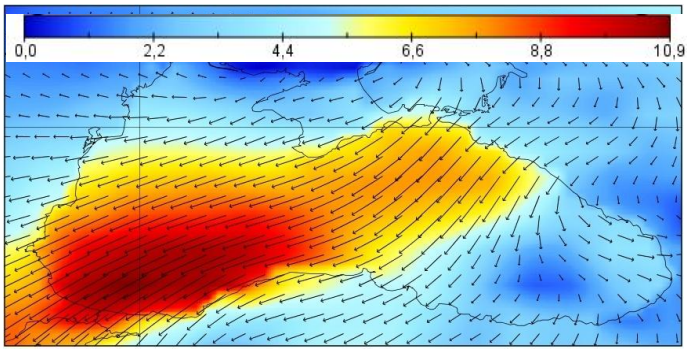


Рисунок 5.1 – Батиметрическая карта Черного моря (м). Стрелкой указана интересующая в дальнейшем прибрежная область



19 сентября 2011 г.



27 сентября 2011 г.

Рисунок 5.2 – Приземные скорости (м/с) и направления ветра по данным реанализа ERA-Interim

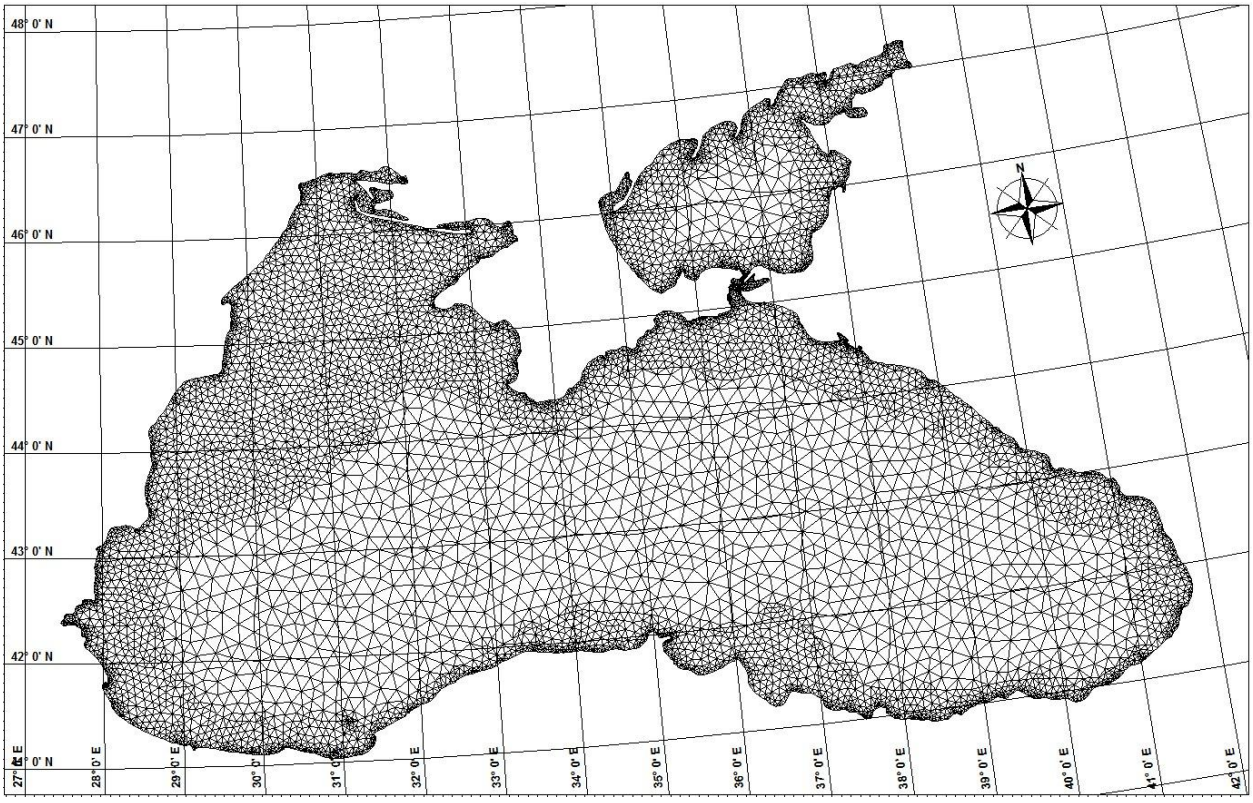
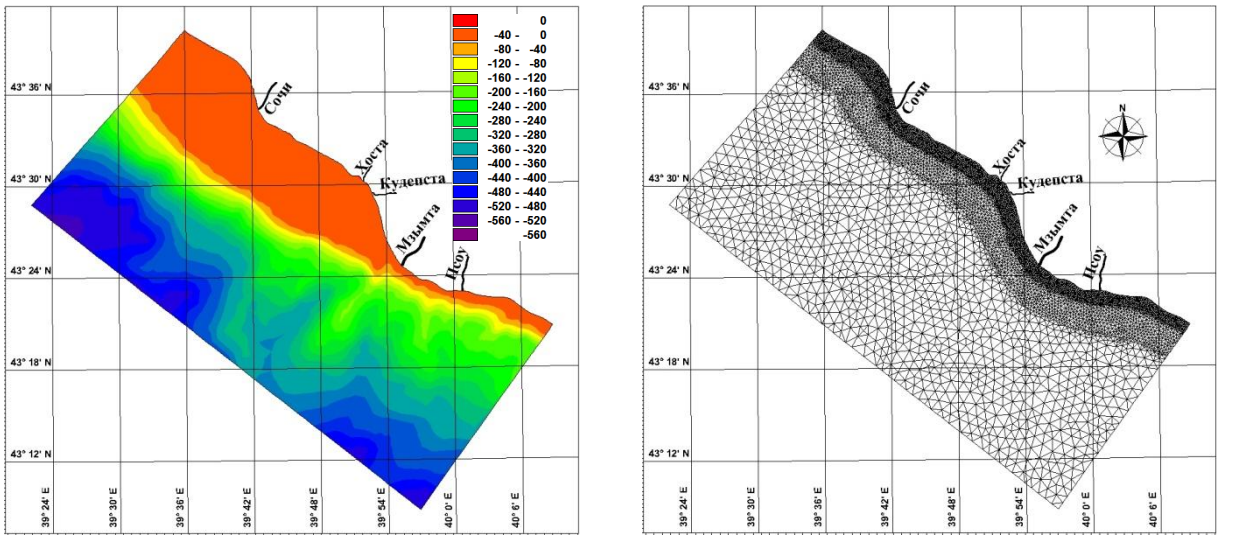


Рисунок 5.3 – Расчетная сетка, покрывающая акватории Черного и Азовского морей

Значения скоростей течений, расходов и уровней, полученные по крупномасштабной модели, служат входными параметрами при моделировании распространения речных плюмов в прибрежной зоне. Интересующая нас область – участок побережья в районе г. Сочи Краснодарского края. Батиметрическая карта участка приведена на рисунок 5.4а. Расчетная 10-слойная сетка состоит из 4000 элементов (рисунок 5.4б). Расходы рек приняты постоянными и соответствующими среднегодовым климатическим показателям.



а) б)

Рисунок 5.4 – Исходная батиметрия, м (а), расчетная сетка (б)

Качество модели определяется соответствием расчетных и экспериментальных величин. В нашем случае весьма показательны спутниковые снимки побережья, позволяющие достаточно надежно проследить трансформацию речных плюмов. Рассматриваемый в настоящем исследовании период – сентябрь 2011 г., для которого имеются качественные снимки прибрежной зоны (за 19 и 27 сентября).

Проведенные по крупномасштабной модели расчеты позволили получить необходимые в дальнейшем временны́е ряды уровня моря, скоростей и направлений течений, расходов сквозь жидкие границы, а также высот, периодов и направлений ветрового волнения за весь сентябрь 2011 г. На рисунке 5.5 в качестве примера приведена карта поверхностных течений в Черном и Азовском морях за 19 сентября 2011 г.

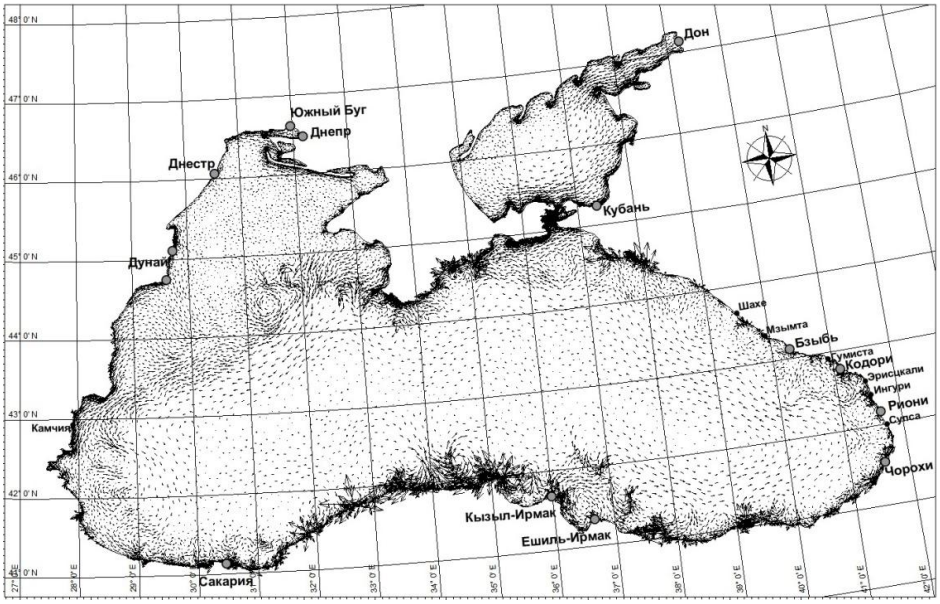


Рисунок 5.5 – Карта поверхностных течений 19.09.2011

С полученных карт снимаются значения параметров течений и поверхностного ветрового волнения (рисунок 5.6 и 5.7).

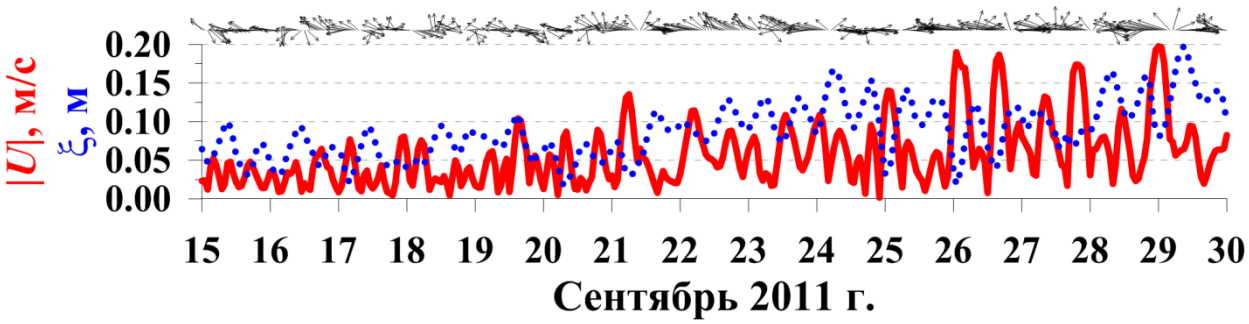


Рисунок 5.6 – Модули горизонтальной скорости течений (м/с), высоты уровня моря (м), а также направление течений в районе г. Сочи за рассматриваемый период

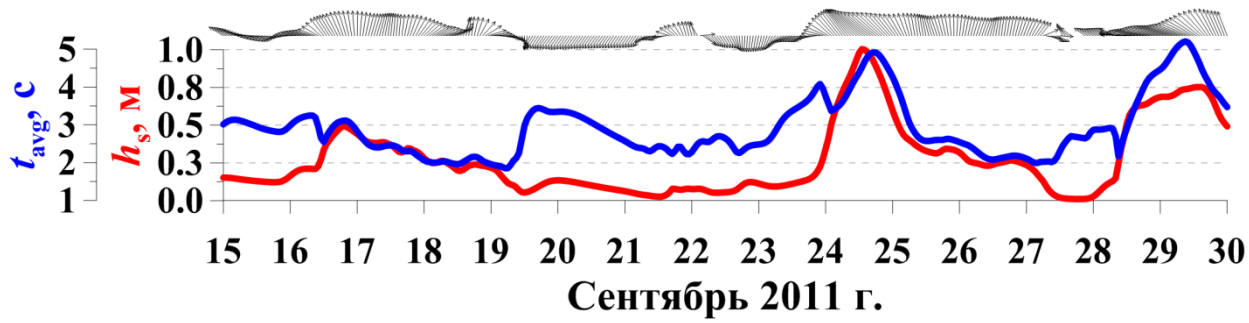


Рисунок 5.7 – Значительные высоты волн (м), средние периоды (с) и направления волнения в районе г. Сочи за рассматриваемый период

Таким образом, во второй половине сентября 2011 г. гидродинамические условия в районе г. Сочи был следующими: слабые течения переменных направлений с преобладанием течений на северо-запад; ветровое волнение со значительными высотами волн порядка 0.5 м и некоторым усилением в конце месяца. Ветер слабый, 2-5 м/с преимущественно северо-восточных направлений.

Основные параметры, определяющие трансформацию речных плюмов в прибрежной зоне:

1. Батиметрия и конфигурация береговой линии.
2. Направление и скорость ветра. Используются данные реанализа ERA-Interim.
3. Течения и волны. Используются расчетные величины, полученные по крупномасштабной модели.
4. Температура и соленость прибрежных вод. Используются климатические среднемесячные трехмерные поля температуры и солености.
5. Источники (реки). Расходы принимаются равными средним многолетним. Концентрация взвешенных веществ (илистых фракций) для всех рек – 10 г/л. Принимая во внимание зависимость скорости осаждения илистых компонент от концентрации, скорость осаждения находится на основе данных из работы (Chai et al., 2002, рисунок 5.8). Скорость осаждения, принимаемая в расчетах, составляет 2 мм/с.

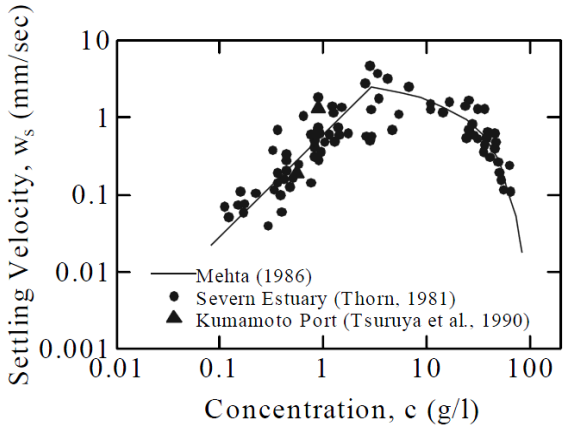


Рисунок 5.8 – Зависимость скорости осаждения илистых компонент от концентрации

Результаты расчетов приведены на рисунке 5.9. Из рисунка видно, что модельные данные, в целом, качественно соответствуют наблюденному характеру распространения речных плюмов. Необходимо отметить, что синоптическая ситуация 19 сентября мало отличалась от ситуации, имевшей место 27 сентября 2011 г. При этом поведение плюмов

кардинально отличается. 19 сентября плюм распространялся практически перпендикулярно берегу в условиях крайне слабых прибрежных течений. 27 сентября плюм оказался в зоне действия вдольберегового течения, что привело к его распространению в северо-западном направлении. Это говорит о том, что анализ процессов в прибрежной зоне без учета влияния более крупномасштабных механизмов не может являться корректным.

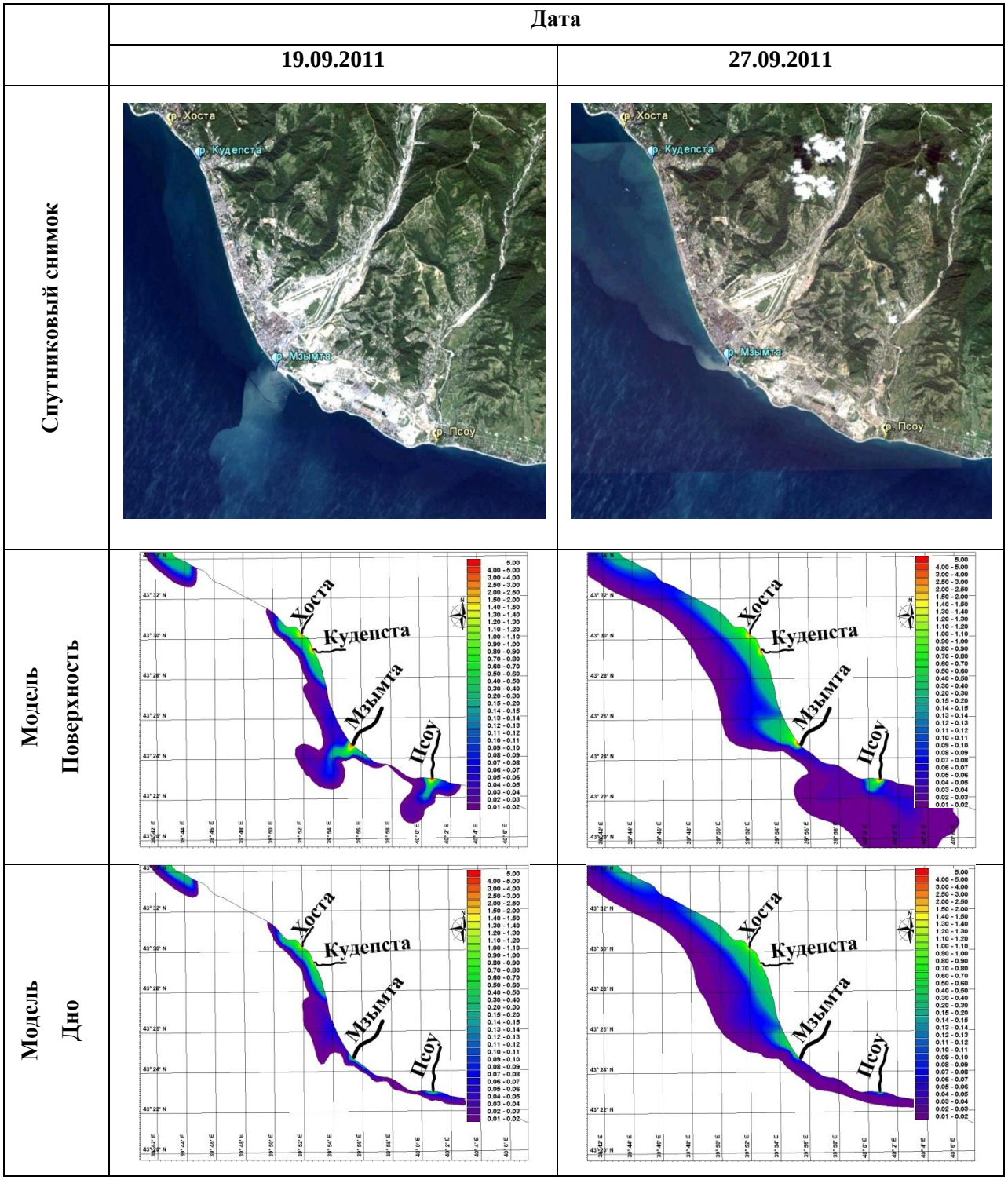


Рисунок 5.9 – Спутниковые снимки и расчетные концентрации взвешенных веществ (г/л) в поверхностном и придонном слоях 19 и 27 сентября 2011 г.

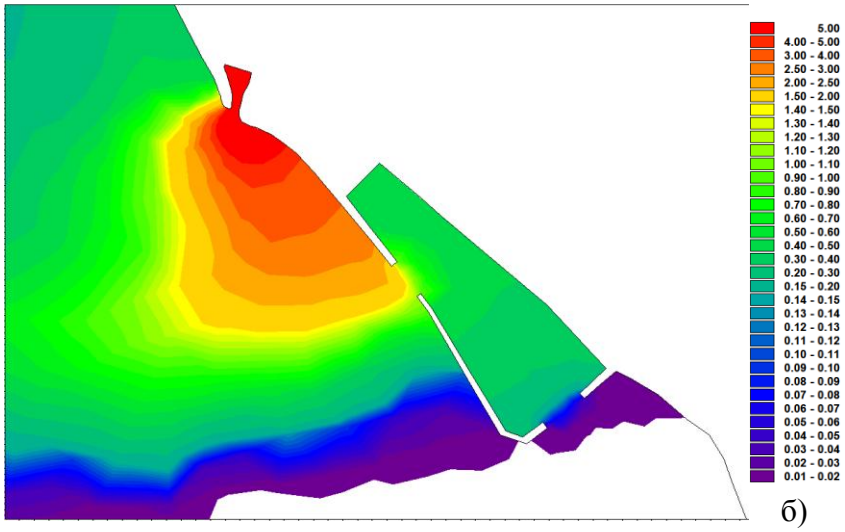
Выполнена детализация результатов моделирования в районе устья реки Мзымта. Выбранный участок представляет научный интерес, т.к. на процесс формирования плюма здесь, кроме естественных, оказывает влияние и антропогенные факторы в виде оградительных сооружений морского порта Адлер. Отметим, что конфигурация оградительных молов принята по факту 2011 г.

Результаты расчетов представлены на рисунках 5.10-5.12. Вертикальные разрезы (рисунок 5.12) свидетельствуют о том, что основной поток речного стока приурочен к верхнему слою. Индикатором плюма в данном случае служит концентрация взвешенного вещества. По мере удаления от источника (устье р. Мзымта) содержание взвеси в воде уменьшается. Основным фактором снижения концентрации взвеси является горизонтальная диффузия.

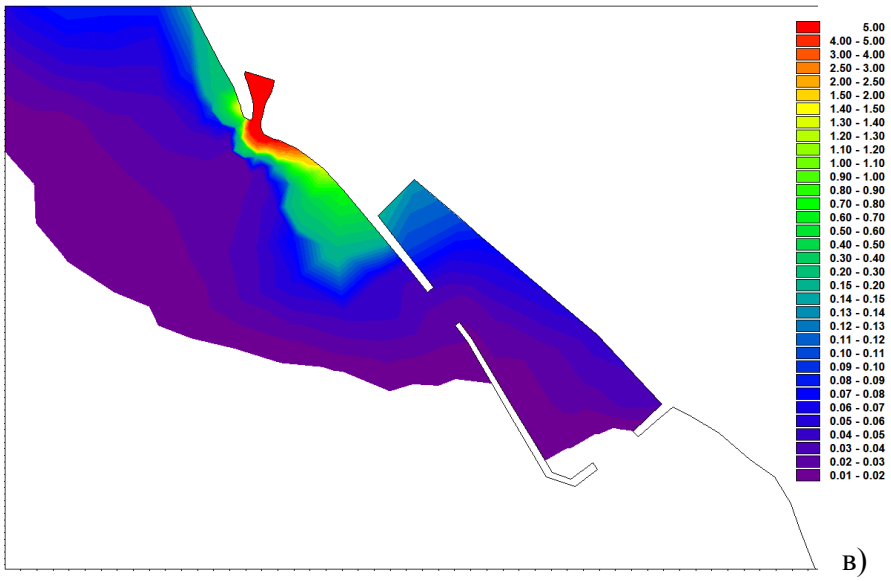
Выводы к разделу 5.

Полученные результаты работ полностью соответствуют требованиям Плана работ научного исследования.

а)



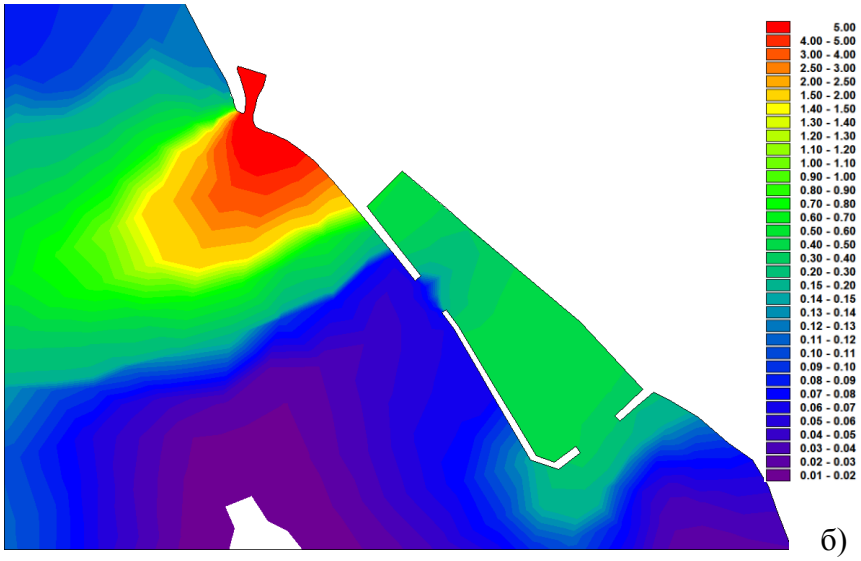
б)



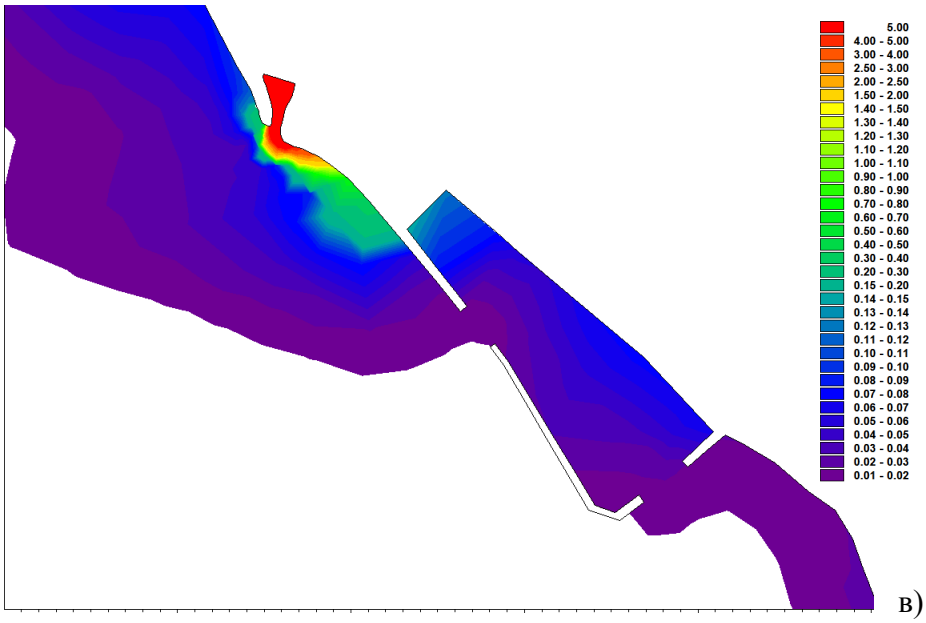
в)

Рисунок 5.10 – Спутниковый снимок (а), а также расчетные концентрации взвешенных веществ (г/л) в поверхностном (б) и придонном (в) слоях 19 сентября 2011 г.

а)



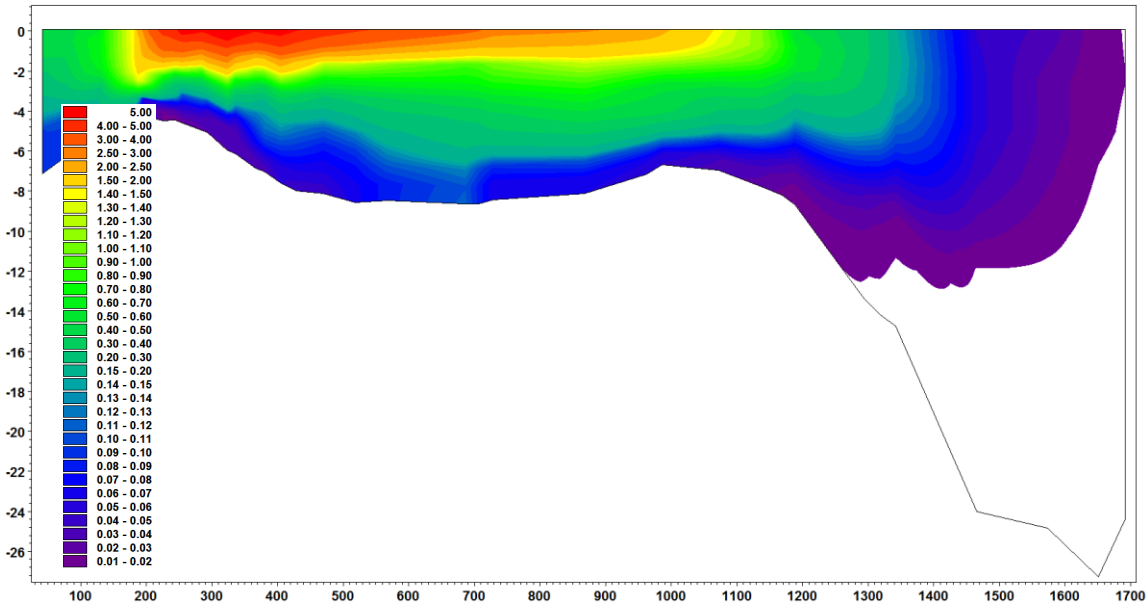
б)



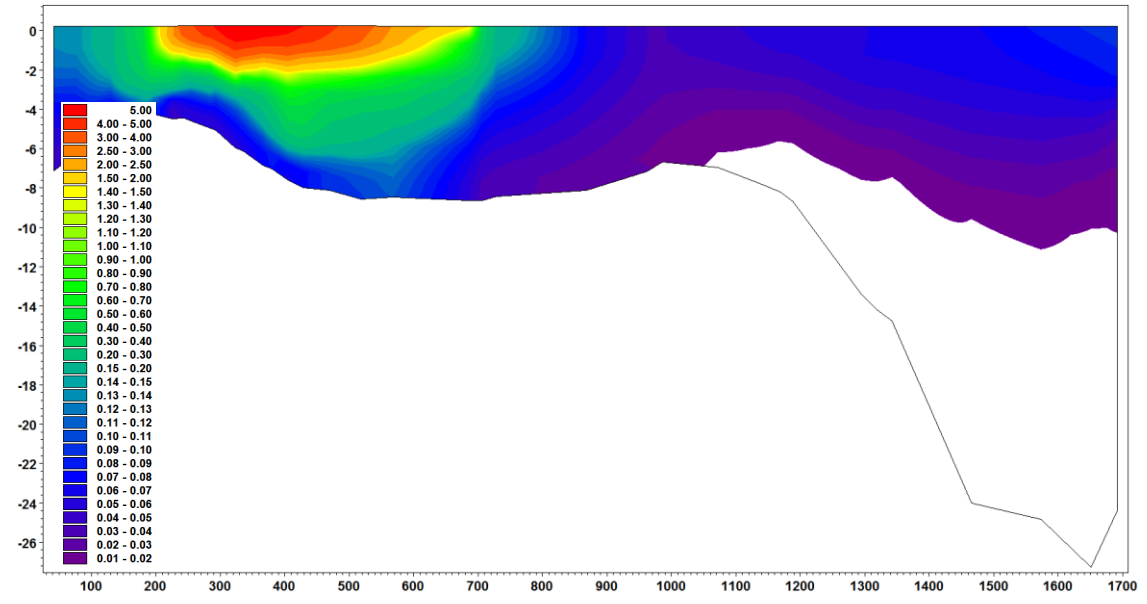
в)

Рисунок 5.11 –Спутниковый снимок (а), а также расчетные концентрации взвешенных веществ (г/л) в поверхностном (б) и придонном (и) слоях 27 сентября 2011 г.

а)



б)



в)

Рисунок 5.12 – Вдольбереговые вертикальные разрезы по взвешенным веществам: положение разреза (а), распределение взвешенных веществ (г/л) 19.09.2011 (б), распределение взвешенных веществ (г/л) 27.09.2011 (в)

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ К РАЗДЕЛУ 5

Джаошвили Ш. Реки Черного моря. Европейское агентство по охране окружающей среды. Технический отчет № 71. 2002. С. 58.

Chai J., Hayashi S., Yamanishi H. Effect of submerged dike/lifted area on seabed mud transport. Proceedings of the International Symposium on Lowland Technology, Saga University, September 2002.

---

6 Информирование научного сообщества и общественности о ходе проекта. Проведение опросов «стейкхолдеров» (заинтересованных организаций и предприятий) региона и анализ проведенных опросов.

6.1 Методика проведения опросов «стейкхолдеров» (заинтересованных организаций и предприятий) региона и результаты анализа проведенных опросов

6.1.1 Онлайн-платформа System of Systems (SoS)

Одной из основных целей проекта DOORS является создание и тестирование управляемой пользователями онлайн-платформы System of Systems (SoS), которая будет собирать, интегрировать, предоставлять свои данные и наблюдения и предлагать специализированные услуги и продукты сообществам заинтересованных сторон Черноморского бассейна. Данные о физических, химических и биологических свойствах Черного моря из различных источников в сочетании с требованиями пользователей будут объединены для создания новой интегрированной базы данных, которая будет поддерживать исследовательскую и инновационную деятельность DOORS в Черноморском регионе.

Таким образом, чтобы удовлетворить потребности пользователей, SoS должна обеспечивать бесперебойное выполнение цепочки предоставления услуг путем устранения всех критических пробелов в системе наблюдений, технологиях, доступности данных и устойчивости системы. SoS должна быть способна адаптироваться к изменяющимся потребностям пользователей, возможностям финансирования и технологическим достижениям, а также обеспечивать комплексную систему наблюдения за физическим, биогеохимическим и биологическим состоянием Черного моря и его эволюцией. SoS также должна обеспечивать быстрый доступ к надежным и точным

данным и информации, которые должны быть свободно и открыто доступны для использования конечными пользователями.

В 2022 г. в рамках проекта DOORS разрабатываются базы данных и научных знаний для платформы SoS DOORS. Для этой цели была разработана методика опроса стейкхолдеров, которая поможет совместно создавать услуги, отвечающие потребностям широкого спектра пользователей и требованиям к принятию решений.

6.1.2 Методика опроса стейкхолдеров

Работа над поставленной задачей – созданием онлайн-анкеты для стейкхолдеров - велась в тесном сотрудничестве с зарубежными партнерами по проекту DOORS в рамках Рабочей группы 3 «Комплексные наблюдения» (WP 3 Integrated Observatory), а также Рабочей группы 2 «Гармонизация» (WP 2 Harmonisation), Рабочей группы 6 «Синий рост» (WP 6 Blue Growth), и Рабочей группы 8 «Взаимодействие с заинтересованными сторонами и наследие» (WP 8 Stakeholder Engagement and Legacy). Список вопросов и варианты ответов согласовывались в рамках онлайн-совещаний вышеуказанных рабочих групп с учетом опыта предыдущих международных проектов по Средиземному и Черному морю, а также с учетом работы баз данных EuroGOOS, Euro-Argo, EMSO, Life-Watch, EMBRC, SeaDataNet, EMODnet, CMEMS INS TAC и др. Онлайн-работа с анкетой была продемонстрирована и протестирована на совместном заседании вышеуказанных рабочих групп, где устранялись выявленные недочеты в формулировках вопросов и ответов, а также в функционировании самой электронной анкеты. Вопросник был полностью подготовлен в январе 2022 г., и опрос стейкхолдеров был проведен в феврале 2022 г. Вопросник находится по вэб-ссылке https://ec.europa.eu/eusurvey/runner/DOORS_Survey2022. Представители каждой из черноморских стран проводили опрос по списку своих национальных стейкхолдеров, которые лучше всего соответствовали тематике опроса - базы данных о физических, химических и биологических свойствах Черного моря. В РФ такой список состоял из 25 респондентов, которые работают в организациях РАН, Росгидромета, Министерства науки и высшего образования и ВНИРО.

Всего в рамках проекта DOORS было получено 140 ответов от стейкхолдеров, которые распределились следующим образом между странами: Болгария -20, Грузия -16, Республика Молдова -7, Румыния – 62, Российская Федерация -12, Турция -13, Украина – 10. В результате проведенного опроса в нашем распоряжении оказались ответы только российских респондентов. В марте 2022 г. руководство проекта DOORS по известным причинам временно прекратило контакты с российскими участниками проекта, поэтому

общие результаты исследования неизвестны. Однако, для РФ не меньший интерес представляют результаты опроса российских специалистов, которые мы проанализировали и представляем в данном отчете.

Анкета содержала следующие разделы и вопросы (численные значения, приведенные в Анкете, представляют ответы 12 российских респондентов в обобщенном виде):

1) Общие сведения

а) Имя

б) Фамилия

в) E-mail

г) Страна проживания

д) Что лучше всего описывает институт/организацию, в которой Вы работаете? (Пожалуйста, выберите все подходящие варианты из списка ниже)

- Органы государственной власти 0
- Научно-исследовательское учреждение 11
- Коммерческая организация или частная компания 0
- Неправительственная организация 0
- Национальное правительство 0
- Другое – Университет 1

е) В каком секторе Вы работаете или за что отвечаете? (Пожалуйста, выберите все подходящие варианты из списка ниже)

- Наука и образование 12
- Туризм и отдых 0
- Окружающая среда и управление биоразнообразием 0
- Рыболовство 1
- Аквакультура 1
- Управление отходами 0
- Нефть и газ 0
- Порты и судоходство 0
- Освоение прибрежных районов 2
- Другое

ж) Какова Ваша роль в вашей организации? (Пожалуйста, укажите Вашу должность или роль).

- Научный сотрудник 2
- Ведущий научный сотрудник 4
- Зав. Лабораторией 3
- Зам. директора 2
- Директор 1

и) В какой части Черного моря Вы работаете/за которую несете ответственность? (Пожалуйста, назовите район. Это может быть конкретная бухта, охраняемая территория или более крупная территория или акватория.)

- Черное море 3
- Северо-восток 7
- Азовское море 5
- Керченский пролив 2
- Шельф Крыма 2

2) Потребности пользователей и требования к информации

а) К каким из следующих продуктов и услуг, связанных с морскими данными, Вы имеете доступ или могли бы воспользоваться для поддержки своих повседневных исследований? (Пожалуйста, выберите все подходящие варианты из списка ниже)

- Современный анализ на основе существующих данных 10
- Наблюдения в режиме, близком к реальному времени 10
- Краткосрочное прогнозирование (дни) 6
- Долгосрочные прогнозы (годы) 6
- Сценарное прогнозирование 4
- Другое

б) Укажите, какие параметры Вас интересуют? (Пожалуйста, выберите все подходящие варианты из списка ниже)

- Температура 10
- Соленость 9
- Батиметрия 7
- Кислород 6

- Питательные вещества 6
- Хлорофилл 5
- Загрязнение морской среды 6
- Донные отложения 5
- Другое – Уровень моря 1

в) Для каких из следующих задач Вам нужны эти информационные продукты и услуги? (Пожалуйста, выберите все подходящие варианты из списка ниже)

- Мониторинг морской среды 12
- Управление морскими живыми ресурсами 1
- Управление морскими неживыми ресурсами 2
- Оценка морских условий для планирования текущих операций на море 2
- Планирование специальных мер защиты в случае экстремальных явлений 3
- Комплексное управление прибрежной зоной 5
- Морское пространственное планирование 0
- Другое

г) Используете ли Вы какие-либо порталы или репозитории для получения данных или продуктов, полученных из данных наблюдений?

- Да 10
- Нет 2

д) Какие именно? (Пожалуйста, выберите все подходящие варианты из списка ниже)

- Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS) 5
- European Marine Observation and Data Network (EMODnet) 3
- Pan-European infrastructure for ocean & marine data management (SeaDataNet) 1
- WekEO platform 0
- Национальные базы данных 6
- Базы данных университетов и научно-исследовательских организаций 5
- Другое
- Если Другое, укажите, пожалуйста.

  Satellite databases of NASA, ESA, CNES. Earth data from NASA Giovanni 1

е) Есть ли какие-либо проблемы, связанные с доступом к продуктам данных, которые Вы используете в настоящее время?

- Да 4
- Нет 8

ж) Какие именно? (Пожалуйста, выберите все подходящие варианты из списка ниже)

- Трудности с доступом к данным 1
- Недоступность данных 3
- Лицензии 1
- Барьеры аутентификации, такие как входы в систему или брандмауэры 1
- Другое

и) Какой тип данных необходим для Ваших исследований? Пожалуйста, оцените свои предпочтения от 1 до 5 в порядке приоритета (от 1 = высокий приоритет до 5 = низкий приоритет) (таблица 6.1).

Таблица 6.1 – Оценки предпочтений типа данных для исследований

	1 – высокий приоритет	2	3	4	5 – низкий приоритет
Исторические данные измерений	7	3	1	1	
Передача данных с датчиков практически в реальном времени	7	3	1		1
Краткосрочное прогнозирование (дни)	3	2	3	2	1
Среднесрочное и долгосрочное прогнозирование (годы)	2	3	1	1	2
Частое (ежедневное/еженедельное) пространственное покрытие Черного моря	4	4	1	1	1

к) Что касается данных мониторинга, каково будет приемлемое временное разрешение данных для Ваших задач? (Пожалуйста, выберите все подходящие варианты из списка ниже)

- Сезонное 4
- Ежемесячное 5
- Еженедельное 4
- Ежедневное 9
- Другое

л) Какова пространственная область Ваших приложений? (Пожалуйста, выберите все подходящие варианты из списка ниже)

- Внутренние и переходные 5
- Прибрежная 11
- Шельф 11
- Открытое море 6
- Другое

м) Каково приемлемое горизонтальное пространственное разрешение данных, необходимое для Ваших исследований? (Пожалуйста, выберите все подходящие варианты из списка ниже)

- Точки 4
- <10 м 5
- <100 м 4
- <500 м 6
- <1 км 6
- <10 км 5
- Другое

3) Спецификация системы

а) Как бы Вы хотели получить доступ к данным или взаимодействовать с ними? Пожалуйста, оцените ваши предпочтения от 1 до 3 в порядке приоритета (1 = высокий приоритет, 3 – низкий приоритет) (Таблица 6.2).

Таблица 6.2 – Оценки предпочтений доступа к данным

	1 – высокий приоритет	2	3 – низкий приоритет
Через приложение для мобильного телефона или планшета с визуализацией данных	2	3	6
Через онлайн-портал данных на Вашем настольном или портативном компьютере — например, с интерактивным геопространственным интерфейсом, с визуализацией данных и возможностью загрузки информации	8	2	1
Через API (интерфейс прикладного программирования), обеспечивающий прямую передачу данных в ваши собственные системы данных	5	1	4

б) Как Вы хотите, чтобы предоставлялись данные? (Пожалуйста, выберите все подходящие варианты из списка ниже)

- Временные ряды, например графики временных рядов в интересующих местах 10
- Карты 11
- Таблицы (Табличная сводка статистики (мин., макс., среднее и т. д.) 7
- Другое

в) Где требуется доступ к исходным данным, в каком формате Вы бы предпочли доступ к данным? Пожалуйста, оцените свои предпочтения от 1 до 5 в порядке приоритета (от 1 = высокий приоритет до 5 = низкий приоритет) (таблица 6.3).

Таблица 6.3 – Оценка предпочтений формата доступа данных

	1 – высокий приоритет	2	3	4	5 – низкий приоритет
CSV	6	2		1	3
XML	3		3	1	4
ESRI shapefile	4		2	1	4
Excel	7	2	1		2
NetCDF	3	2	2		4

4) Заключительные замечания

а) Интересна ли Вам онлайн-платформа, которая предоставляет продукты данных с индивидуальными информационными услугами для Черного моря, предложенная DOORS?

- Да 9
- Нет 0
- Может быть/Не знаю 3

б) Если у Вас есть дополнительные вопросы или комментарии, которые не были отражены в Анкете, добавьте их ниже.

в) Есть ли у Вас какие-либо предложения от других организаций, государственных органов или предприятий, которые могут быть заинтересованы в платформе SoS DOORS?

6.1.3 Результаты анализа проведенных опросов

Основные выводы, которые можно сделать из проведенного опроса, следующие:

1. Большинство респондентов работает в научно-исследовательских организациях и занимается наукой и образованием, что несколько сужает сферу деятельности респондентов, поскольку не охвачены такие организации, как органы государственной власти, коммерческие или частные компании, правительственные или неправительственные организации, и такие сектора экономики, как туризм и отдых, рыболовство и аквакультура, управление отходами, нефтегазовая отрасль, порты и судоходство. Однако именно эти специалисты занимаются или используют профессиональные научные базы данных о состоянии окружающей среды Черного и Азовского морей, поэтому их мнение должно отражать реальное состояние дел в этом вопросе. Среди респондентов были и научные сотрудники, и ведущие научные сотрудники, а также заведующие Лабораториями, заместители Директоров и Директора организаций. Различный уровень должностной ответственности респондентов чрезвычайно важен для проводимого исследования, поскольку респонденты имеют разный опыт использования тех или иных баз данных.

2. В качестве основного района исследований большинство респондентов назвало северо-восточную часть Черного моря и Азовское море, что объяснятся тем, что именно здесь находятся территориальное море и исключительная экономическая зона Российской Федерации и именно здесь проводится большинство морских и прибрежных экспедиционных работ российскими специалистами (Зацепин, Флинт, 2002; Kostianoy, Kosarev, 2008; Lavrova et al., 2011, 2016; Завьялов, Зацепин, 2018) . Четверть респондентов указало все Черное море в качестве объекта исследований.

3. В качестве основных продуктов и услуг, связанных с морскими данными, которыми специалисты могли бы воспользоваться для поддержки своих повседневных исследований, подавляющее большинство респондентов назвало «Современный анализ на основе существующих данных» (10) и «Наблюдения в режиме, близком к реальному времени» (10). Половина участников указала «Краткосрочное прогнозирование (дни)» (6) и «Долгосрочные прогнозы (годы)» (6), и только треть респондентов – «Сценарное прогнозирование» (4).

4. В качестве наиболее востребованных параметров морской окружающей среды респонденты назвали «температуру» (10), «солёность» (9) и «батиметрию» (7), примерно половина респондентов назвала все остальные параметры – кислород, питательные вещества, хлорофилл, загрязнение окружающей среды и донные отложения. Такой выбор очевиден и объясняется тем, что именно первые три параметра являются ключевыми не только для гидродинамических, но и биогеохимических процессов в море. В Анкете

отсутствовал еще один из важнейших параметров – уровень моря, что было отмечено одним из респондентов.

5. В качестве приоритетных задач, для которых нужны эти информационные продукты и услуги, подавляющее большинство респондентов указало «Мониторинг окружающей среды» (12), что, с одной стороны, отражает основное направление деятельности большинства специалистов, а с другой – наличие тех или иных проблем в состоянии морской среды Черного моря и явного недостатка в их исследовании. Примерно половина респондентов указала на комплексное управление прибрежных зон (КУПЗ), что является чрезвычайно важной задачей не только для Черного, но и для других морей Российской Федерации (Mikhaylichenko, 2006). Следует отметить, что никто из респондентов не отметил «Морское пространственное планирование» (МПП, или Marine Spatial Planning - MSP), что объясняется двумя причинами: во-первых, в английском языке в слове «Spatial» была допущена ошибка, и вместо него было написано «Special», таким образом, респонденты могли не идентифицировать MSP планирование; во-вторых, о морском пространственном планировании до сих пор мало кто знает в России. МПП, по определению МОК-ЮНЕСКО, – это публичный процесс анализа и распределения пространственного и временного распределения человеческой деятельности в морских районах для достижения экологических, экономических и социальных целей, которые были определены в ходе политического процесса. МПП — это не самоцель, а практический способ создать и наладить более рациональное использование морского пространства и взаимодействия между его пользователями, сбалансировать требования к развитию с необходимостью защиты окружающей среды и добиться социальных и экономических результатов открытым и планомерным способом (MSP, 2022).

6. Практически все респонденты ответили, что в своей деятельности используют какие-либо порталы или базы данных о состоянии окружающей среды, при этом из предложенного списка большинство респондентов указало национальные базы данных (6), базы данных университетов и научно-исследовательских организаций (5), а также Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS) (5). Другие три европейские базы данных оказались менее востребованными, вероятно, из-за отсутствия информации о них в научных кругах. Один из респондентов указал на ряд международных баз данных спутниковой информации, которые отсутствовали в Анкете.

7. Две трети респондентов отметили, что они не испытывают каких-либо проблем, связанных с доступом к базам данных, которые они используют в настоящее время. Те респонденты, которые испытывали проблемы, указали на недоступность данных в качестве основной проблемы.

8. На вопрос «Какой тип данных необходим для Ваших исследований?» респонденты расставили наиболее высокий приоритет историческим данным измерений (7), данным, передаваемым в режиме реального времени, (7) и данным с ежедневным/еженедельным пространственным покрытием всего Черного моря (4). Что касается временного разрешения данных, то наиболее востребованными оказались ежедневные данные (9), треть респондентов указала еженедельные, ежемесячные и сезонные данные. Наиболее часто респонденты указывали прибрежную зону и шельф в качестве приоритетных районов исследования, и только половина указала открытое море. Что касается пространственного разрешения данных, абсолютно все измерения от данных в точке до 10 км востребованы пользователями в зависимости от решаемых задач.

9. Большинство респондентов предпочитает получать данные через онлайн-порталы данных на настольном или портативном компьютере, например, с интерактивным геопространственным интерфейсом, с визуализацией данных и возможностью загрузки информации. Наименьший приоритет отдан приложениям для мобильных телефонов и планшетов, что неудобно для камеральной научной работы, однако в экспедиционных условиях они могли бы быть весьма полезными.

11. Опрос показал, что респонденты предпочитают получать данные в виде временных рядов, графиков и карт и в меньшей степени - в виде табличных величин. Что касается формата предоставляемых данных, то предпочтение отдается XLS (формат файлов программы Microsoft Excel) и CSV (файлы данных с разделителями-запятыми), в меньшей степени - форматам ESRI shapefile (векторный формат географических файлов, который разрабатывается и поддерживается компанией ESRI), XML (расширяемый язык разметки) и NetCDF (двоичный формат файлов).

12. В заключение подавляющее большинство респондентов отметило, что разрабатываемая в рамках проекта DOORS онлайн-платформа, которая будет предоставлять продукты данных по Черному морю с индивидуальными информационными услугами, будет интересна для их работы.

Заключение к разделу 6

Проведенный опрос был направлен на то, чтобы обеспечить обмен информацией о взаимодействии с заинтересованными сторонами (стейкхолдерами), а также совместно разрабатывать планы и действия по вовлечению стейкхолдеров в реализацию дальнейших мероприятий.

Проведенный опрос по базам данных основных параметров морской среды был первым в серии запланированных опросов различных стейкхолдеров. Приостановление

сотрудничества в рамках проекта DOORS никак не влияет на продолжение исследований, проводимых российскими участниками проекта в рамках проекта Министерства науки и высшего образования РФ «Комплексные исследования экологического состояния вод прибрежной зоны северо-восточного шельфа Чёрного моря в рамках участия в международном проекте DOORS» в рамках Соглашения N 075-15-2021-941 (13.2251.21.0008), поскольку они могут выполняться автономно вне зависимости от зарубежных партнеров.

Полученные результаты работ полностью соответствуют требованиям Плана работ научного исследования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ К РАЗДЕЛУ 6

Завьялов П.О., А.Г. Зацепин (отв. ред.), Д.Н. Елкин, В.М. Журбас, А.С. Ижицкий, Е.С. Ижицкая, Г.А. Колючкина, Б.В. Коновалов, К.А. Коротенко, О.А. Короткина, А.В. Костылева, А.А. Кубряков, С.Б. Куклев, П.Н. Маккавеев, Ю.Р. Налбандов, И.А.Немировская, А.А. Осадчиев, А.Г. Островский, В.В. Пелевин, О.И. Подымов, А.Н. Серебряный, К.П. Сильвестрова, С.В. Станичный, Д.Я. Фащук, Е.Е. Химченко, П.В. Хлебопашев, В.К. Часовников, 2018. Гидрологические и экологические процессы в прибрежной зоне Черного моря. М., Научный мир, 439 с., ISBN 978-5-91522-4.

Зацепин А.Г., Флинт М.В. Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря. Москва: Наука, 2002, 476 с.

Костяная Е.А., Шаповалов С.М., Костяной А.Г. Морские кластеры как инструмент достижения ЦУР14 для южных морей России. – Океанологические исследования, 2018, Т.46, N3, С.234-247. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2018.46(3).15.

Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Митягина М.И., Гинзбург А.И., Шеремет Н.А. Комплексный спутниковый мониторинг морей России. Москва: ИКИ РАН, 2011. 470 с.

Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Костяной А.Г. 2016. Спутниковые методы выявления и мониторинга зон экологического риска морских акваторий. М., ИКИ РАН, 334 с.

Шаповалов С.М. Десятилетие ООН наук об Океане и фундаментальные задачи российской океанографии. – Вестник РФФИ, 2022, N2 (114), С. 13-19. DOI: 10.22204/2410-4639-2022-114-02-13-19.

Шаповалов С. М., Костяная Е. А. Рациональное использование южных морей России в условиях климатических, экологических и техногенных вызовов. - Проблемы постсоветского пространства. 2018, Т.5, N1, С. 37-49.

Шаповалов С.М., Костяная Е.А., Костяная Е.В., Костяной А.Г. Устойчивое развитие на Южных морях России. ИОРАН, Москва, 2019, 68 с.

Kostianoy A.G., Kosarev A.N. (Eds.). “The Black Sea Environment”. The Handbook of Environmental Chemistry. Vol.5: Water Pollution, Part 5Q. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York. 2008. 457 pp. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74292-0.

Mikhaylichenko Yu.G. Development of an integrated coastal zone management system for the Black and Caspian seas. - In: Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, Springer, 2006, V. 11, No. 3, P. 521-537.

MSP (2022) https://ioc.unesco.org/our-work/marine-spatial-planning.

The United Nations Decade of Ocean Science for Sustainable Development (2021-2030) Implementation Plan (IOC Ocean Decade Series, 20) FR, Paris, UNESCO, 2021 (https://unesdoc.unesco.org/ark:48223/pf0000376780/pdf/376780eng.pdf.multi).

Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. Resolution A/RES/70/1, UN General Assembly, 25 September 2015. (https://undocs.org/ru/A/RES/70/1).

---

7 Подготовка по результатам реализации проекта материалов не менее 4 статей для их публикации в научных журналах, индексируемых в базах данных "Scopus" и (или) Web of Science Core Collection

По результатам реализации проекта опубликованы 4 статьи в ведущих рецензируемых журналах.

1) Hydrocarbon pollution in the waters and sediments of the Kerch Strait. Inna A. Nemirovskaya, Peter O. Zavialov, Anastasia V. Khramtsova. Marine Pollution Bulletin 180 (2022) 113760

Перевод с английского языка аннотации статьи:

Углеводородное загрязнение вод и донных отложений Керченского пролива (И.А. Немировская, П.О. Завьялов, А.В. Храмцова)

Приведены результаты изучения содержания и состава алифатических углеводородов и полициклических ароматических углеводородов во взвеси поверхностных вод и в поверхностном слое донных отложений в 2019-2021 гг. в

Керченском проливе в сравнении с более ранними исследованиями в других районах Черного моря (представлены Феодосийский залив, Туапсинский район, Прибрежные воды Крымского полуострова, Большой Сочи, Центральная часть моря). Несмотря на высокие концентрации алифатических углеводородов (особенно в водах самого пролива: 28-254 в среднем 87 мкг/л. Наибольшее содержание алифатических углеводородов приурочено к сечению через Керченский пролив. Накопление алифатических углеводородов, а также как взвесь, встречается в западной части пролива, что связано с преобладающим направлением ветра и прибрежной орографией. Состав алканов не соответствовал характерному для нефти плавному распределению гомологов. В большинстве случаев их распределение было бимодальным, что может свидетельствовать о смешанном генезисе алканов. Среди низкомолекулярных алканов преобладали либо четные автохтонные алканы n-C16, C18, C22, возникающие при микробной трансформации алифатических углеводородов, либо n-C17, свидетельствующие о включении алканjd фито- и зоопланктона. Несмотря на разные источники поступления углеводородов, распределение суммарных концентраций алифатических углеводородов и полициклических ароматических углеводородов в основном совпадали. В составе полициклических ароматических углеводородов преобладали флуорантен и пирен, образующиеся в высокотемпературных процессах горения. Низкие значения отношения Σнафталины/фен (0,05–0,11) могут свидетельствовать о незначительном включении нефтяных полиаренов.

В отличие от взвеси поверхностных вод наибольшее содержание УВ в поверхностных отложениях обнаружено не в проливе, а на станциях в районах с алеврито-пелитовыми отложениями, что связано с характером течений в этих районах и более высокой сорбционной емкость тонкодисперсных отложений. Среднее содержание $C_{орг}$ в июле 2020 г. было в 1,8 раза ниже (0,34 %), чем в сентябре 2019 г. (0,63 %), а алифатических углеводородов, наоборот, в 2,2 раза выше (47 мкг/г), чем в апреле 2019 г. (21 мкг/г). В поверхностных отложениях максимальная концентрация алифатических углеводородов установлена в июле 2020 г. (233 мкг/г), а максимальное среднее содержание – в июле 2021 г. (58 мкг/г). Эта область также связана с более высокими концентрациями алифатических углеводородов в составе $C_{орг}$ ..1%. Состав алканов в поверхностных осадках отличался от их состава во взвеси. Отношение низкомолекулярных гомологов к высокомолекулярным (L/H = 0,08-0,54) было ниже, а отношение нечетных и четных (CPI = 1,19-4,58) выше, чем в твердых частицах. Из-за грубого состава осадков содержание полициклических ароматических углеводородов в их поверхностном слое было ниже (0,631 нг/г) по сравнению с другими районами Черного моря. В их составе наряду с флуоратеном и пиреном к доминирующим соединениям относились также метилированные гомологи

нафталина. Корреляционный анализ отдельных полиаренов, а также факторный анализ свидетельствуют об их смешанном генезисе нефтяной + пирогенный, с преобладанием в большинстве проб последнего. Поступление загрязняющих веществ в морскую среду увеличивает содержание углеводородов в воде и донных отложениях, создавая современный углеводородный фон.

2) Пространственно-временна́я изменчивость течений шельфово-склоновой зоны северо-восточной части Черного моря по данным численного моделирования. Б.В. Дивинский, С.Б. Куклев, В.В. Очередник. Океанология, 2022, том 62, № 6, с. 857-868.

Аннотация:

Основная цель работы – исследование пространственно-временно́й структуры морских течений шельфово-склоновой зоны северо-восточной части Черного моря. Исследования проведены методами численного моделирования с использованием объединенной гидродинамической и спектральной волновой моделей, входящих в расчетный комплекс DHI MIKE. Модель верифицирована по данным натурных наблюдений, выполненных средствами гидрофизического полигона ИО РАН (полигон “Геленджик”). В результате расчетов с дискретностью в полчаса получены поля скоростей и направлений течений за период с января 2016 по декабрь 2020 гг. Несмотря на то, что общая длина массива недостаточна для климатических обобщений, анализ полученных данных численного эксперимента позволяет судить о некоторых общих чертах сезонной динамики вод. В результате проведенной работы выявлены особенности колебаний скоростей течений в частотной области, а также, на основании осредненных полей течений, оценены основные сезонные черты циркуляции вод в шельфовой зоне северо-восточного побережья Черного моря.

3) О результатах опроса российских специалистов о создании онлайн-платформы «System of Systems» DOORS с информацией об окружающей среде Чёрного моря. Е.А. Костяная, А. Г. Костяной, П.О. Завьялов. Океанологические исследования, 2022, том 50, № 4, с. 137-150.

Аннотация:

В статье приводятся результаты опроса российских специалистов океанологической тематики на предмет потребности в данных о физическом, биогеохимическом и биологическом состоянии Чёрного и Азовского морей с целью формирования требований по созданию онлайн-платформы «Система систем» (System of Systems, SoS), основанной на современных инструментариях, наблюдениях,

моделировании и интеграции данных, выполненных по методике опроса специалистов, и электронной анкеты, разработанной в рамках международного проекта «DOORS» и Соглашения № 075-15-2021-941 (13.2251.21.0008) с Министерством науки и высшего образования РФ «Комплексные исследования экологического состояния вод прибрежной зоны северо-восточного шельфа Чёрного моря в рамках участия в международном проекте DOORS». Одной из основных целей проекта «DOORS» является создание и тестирование управляемой пользователями онлайн-платформы System of Systems (SoS), которая будет собирать, интегрировать, предоставлять свои данные и наблюдения, а также предлагать специализированные услуги и продукты сообществам заинтересованных сторон Черноморского бассейна.

4) Содержание и природа углеводородов во взвеси поверхностных вод и донных осадков Керченского пролива. И.А. Немировская, П.О. Завьялов, Б.В. Коновалов. Метеорология и гидрология, 2022, № 6, с. 66-78.

Аннотация:

Приведены результаты изучения содержания и состава углеводородов во взвеси поверхностных вод и в поверхностном слое донных осадков в Керченском проливе в июле 2020 г. в сравнении с 2019 г. и с более ранними исследованиями в других районах Черного моря. Несмотря на высокие концентрации алифатических углеводородов (особенно в водах самого пролива – в среднем 78 мкг/л и в грубозернистых осадках – 47 мкг/л), состав алканов не соответствовал нефтяному из-за быстрой трансформации нефтяных алифатических углеводородов. Использование факторного анализа показало, что основной источник загрязнения – пирогенный (от транспорта), в меньшей степени – нефтяной.

2.8 Работы Иностранного партнера, выполняемые за счет средств из внебюджетных источников

В соответствии с планом реализации Проекта работы, проводимые Международным консорциумом DOORS в 2022 году, включали (но не ограничивались):

1) Статистический кластерный анализ и классификация вод Черного моря по оптическим характеристикам.

Использовалась методология Optical Water Type (OWT) на основе 1-километровой версии наборов данных OC CCI за 1997 – 2025 гг. и 300/100 м версий CERTO 2016-2025 гг. оптимизация разработки алгоритмов, в том числе повышение точности оптического определения качества воды (Хл-а, OPOB, общая взвешенность). Для сбора данных об изменении состояния прибрежной и морской среды были объединены и ассимилированы данные отбора проб на месте. Это будет поддерживать широкий спектр деятельности по моделированию и анализу в масштабе бассейна и для соответствующих горячих точек (например, дельты Дуная).

2) Изучение текущих изменений морфологии береговой линии и взвешенных веществ.

Мониторинг проводился с использованием ряда дополнительных методов, сочетающих геодезические GPS-съемки на месте, установленные на лодке акустические датчики в мутных водах и данные с беспилотных летательных аппаратов/спутников в олиготрофных водах с использованием алгоритмов инверсии глубины. Изменения в положении береговой линии и окружающей среде отслеживались с помощью архивных данных Sentinel 2/Landsat в режиме, близком к реальному времени, подтвержденных полевыми кампаниями. Данные Sentinel 2, откалиброванные в ходе полевых кампаний, также использовались для отслеживания взвешенных отложений и определения запасов прибрежных отложений в сочетании с данными CMEMS о течениях и динамике волн для использования в моделях переноса отложений. Они были объединены с данными о прибрежных морфологических изменениях и характеристиках отложений, чтобы помочь определить ячейки прибрежных отложений и прибрежные осадочные ресурсы.

3) Разработка алгоритмов оптимизации анализа данных спутниковых высотомеров CMEMS

Разработка алгоритма для улучшения продуктов CMEMS была основана на данных in situ с учетом временных и пространственных аспектов в соответствии с биогеохимическими продуктами и помеченными пикселями, на которые может влиять отражательная способность дна или смешанные пиксели из-за загрязнения земли. Эти данные использовались для идентификации, тестирования и оптимизации алгоритмов атмосферной коррекции и извлечения биогеохимических составляющих, а также для оценки неопределенностей. Динамические свойства поверхности Черного моря были охарактеризованы с помощью синергетических алгоритмов, основанных на использовании поверхностных течений, полученных с помощью альтиметра CMEMS, и

спутниковых трассеров с более высоким разрешением (например, SST или Chl). Такие алгоритмы были разработаны из глобального океана, протестированы и адаптированы для разработки нового регионального продукта для улучшения пространственно-временного эффективного разрешения поверхностных течений, полученных с помощью альтиметра.

4) Конфигурация компонентов моделирования и наблюдений для оценки изменения климата в Черном море

В 2022 г. была проведена серия разрезов по континууму от берегов и устьев рек до глубоководного бассейна, чтобы зафиксировать траектории физических (T, S и т. д.) и химических (питательные вещества, микропластики, эвтрофикация, обмен CO2). , слой оксигенации и др.) параметры, играющие роль в оценке воздействия на климат Черного моря.

5) Изучение регуляторных функций экосистем и биоразнообразия, в том числе ключевых бентосных сообществ моллюсков Phyllophora, а также сообществ мягких донных грунтов под влиянием речных плюмов.

Были получены современные данные о соответствующих дескрипторах обилия и разнообразия видов в следующих местообитаниях морского дна: (i) уникальная красная водоросль Phyllophora spp. поле на северо-западном шельфе, важный генератор кислорода, участвующий в круговороте питательных веществ и регулировании углеродного насоса; (ii) залежи мидий на западном шельфе, которые являются ключевыми элементами экосистемных услуг (например, биофильтрация и формирование биогенных рифов); (iii) мягкодонные отложения под влиянием речного плюма являются местами накопления органического вещества и склонны к гипоксии. Способность к круговороту питательных веществ в отложениях оценивалась с помощью спускаемого аппарата с бентической камерой для измерения скоростей бентосного круговорота органического вещества (выделение CO_2, потребление O_2, выделение питательных веществ из отложений, производство O_2 видами Phyllophora) при поддержке ex-situ (с корабля). на доске) инкубации осадочного керна.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Задачи, поставленные на второй этап реализации проекта, выполнены полностью.

Работа в рамках проекта в отчетном году проводилась по трем большим разделам: натурные исследования, численное моделирование, а также социально-ориентированные исследования и мероприятия.

Мониторинговые исследования в показали повышенный уровень загрязнения вод Геленджикской и Голубой бухт нефтепродуктами, фенолом, железом и марганцем. Превышения допустимых концентраций в донных отложениях установлены для нефтепродуктов и пестицидов, причем содержание углеводородов зависит от их гранулометрического типа. Концентрации АУВ и ПАУ у северо-восточного побережья Черного моря значительно превосходят фоновые величины. Состав ПАУ, как более устойчивого углеводородного класса, во взвеси и особенно в донных осадках указывает на смешанных генезис полиаренов: нефтяной и пирогенный. В результате численного моделирования: показано отсутствие значительной сезонной изменчивости потока растворенных загрязняющих веществ через Керченский пролив в Черное море, установлены условия образования речного плюма с загрязняющими веществами вдоль побережья, параметризировано ускорение погружения частиц взвеси при осаждении окисленного марганца, рассмотрены сценарии распространения взвеси при различных гидометеорологических условиях. Создана и протестирована онлайн-платформа System of Systems, которая будет собирать, интегрировать, предоставлять свои данные и наблюдения и предлагать специализированные услуги и продукты сообществам заинтересованных сторон Черноморского бассейна. Полученные результаты могут использоваться в практической деятельности предприятий, осуществляющих морскую деятельность в причерноморском регионе РФ.

Работы партнерской иностранной организации (институт GEOECOMAR, Румыния, и международный консорциум DOORS), выполняемые за счет средств из внебюджетных источников, включали в себя характеристику типов черноморских вод по оптическим характеристикам по результатам статистического кластерного анализа, результаты исследований изменений морфологии береговой линии и процессов переноса взвешенного материала, разработку алгоритмов для оптимизации использования данных спутникового альтиметра CMEMS, конфигурирование модельной и измерительной компонент оценки климатических изменений и их влияния на Черное море, исследование регуляторных функций экосистемы и состояния биоразнообразия ключевых бентосных сообществ – моллюсков Phyllophora исообществ мягких донных грунтов под воздействием речных плюмов.

Сведения о ходе выполнения Проекта размещены на сайте Получателя гранта https://doors.land-ocean.ru/